FÜZYON ENERJİSİ VE TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI

RA-POR

KASIM 2026

Milli İstihbarat Akademisi

FÜZYON ENERJİSİ VE TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI

RAPOR / KASIM 2026

Milli İstihbarat Akademisi

Milli İstihbarat Akademisi

Telif

Millî İstihbarat Akademisi © 2026
Ankara - TÜRKİYE

Yayın Tarihi: Kasım 2026

Bu çalışmaya ait içeriğin telif hakları Millî İstihbarat Akademisine ait olup 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu uyarınca kaynak gösterilerek kısmen yapılacak makul alıntılar dışında, hiçbir şekilde önceden izin alınmaksızın kullanılamaz, yeniden yayımlanamaz.

Millî İstihbarat Akademisi
E-Posta: bilgi@mia.edu.tr

"Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5'inci maddesinin 2'nci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir."

RAPOR / Kasım 2026

FÜZYON ENERJİSİ VE TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ 5

YÖNETİCİ ÖZETİ 7

GİRİŞ 11

BÖLÜM 1
FÜZYON ENERJİSİNDE TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM 16

BÖLÜM 2
ULUSLARARASI FÜZYON REKABETİ VE YENİ SANAYİ EKOSİSTEMİ 28

BÖLÜM 3
TÜRKİYE'NİN MEVCUT KONUMU VE OLASI MODELLER 42

BÖLÜM 4
TÜRKİYE ULUSAL FÜZYON ENERJİSİ YOL HARİTASI 54

SONUÇ 66

KAVRAMSAL SÖZLÜK 70

KAYNAKÇA 74

İNFOGRAFİK

İnfografik 1: Füzyon Reaksiyonundan Net Elektrik Üretimine Uzanan Enerji Zinciri 17

İnfografik 2: Eylemsiz Füzyonda Hedef Kazancı ile Net Tesis Kazancı Arasındaki Fark 22

İnfografik 3: Başlıca Füzyon Yaklaşımlarının Teknik Durumu ve Temel Belirsizlikleri 23

İnfografik 4: Ülkelerin Ulusal Füzyon Politikası Modelleri 33

İnfografik 5: ITER'in Temel Amacı, Uluslararası Yapısı, Teknik Özellikleri ve Füzyon Enerjisinin Geliştirilmesindeki Stratejik Rolü 35

İnfografik 6: Füzyon Sanayi Ekosisteminin Katmanları 38

İnfografik 7: Türkiye'nin Füzyon Enerjisi Alanındaki Stratejik Politika Seçeneklerinin Karşılaştırılması 46

İnfografik 8: Önerilen Ulusal Füzyon Programı Yönetişim Yapısı 50

İnfografik 9: Türkiye İçin Önerilen Füzyon Yol Haritası 56

FOTOĞRAF

Fotoğraf 1: İngiltere'nin Culham Bölgesindeki JET Tokamağının İç Görünümü 19

TABLO

Tablo 1: Bazı Özel Füzyon Şirketleri ve Kamuya Açıklanmış Ekonomik Göstergeler 37

Tablo 2: Türkiye'nin Füzyonla İlişkili Potansiyel Kapasite Alanları ve Temel Açıkları 44

ÖN SÖZ

Son yıllarda yaşanan savaşlar, enerji güvenliğinin ülkelerin ekonomik dayanıklılığı ve stratejik hareket alanı açısından taşıdığı önemi yeniden hatırlatmıştır. Rusya-Ukrayna ile ABD/İsrail-İran savaşları, petrol ve doğal gaz tedarikinin jeopolitik gelişmelerden ne ölçüde etkilenebildiğini göstermiştir. Öyle ki arz kesintileri ve fiyat dalgalanmaları, özellikle enerji ithalatına bağımlı ülkeler için sanayiden kamu maliyesine uzanan sonuçlar doğurmaktadır. Her geçen gün önemi artan enerji güvenliğini; üretim altyapılarının dayanıklılığı, kritik teknolojiler ve tedarik zincirlerini hesaba katarak ele almak gerekmektedir.

Yapay zekâdaki hızlı gelişmeler de enerji talebine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Büyük dil modelleri ve veri merkezlerinin artan elektrik ihtiyacı, enerji arzının sürekliliğini dijital rekabet açısından daha önemli hâle getirmektedir. Hesaplama kapasitesi ile enerji altyapısı arasındaki bağ güçlendikçe, ülkelerin teknoloji ve enerji politikalarını birlikte düşünmesi bir zorunluluğa dönüşmektedir.

Türkiye açısından nükleer füzyona yönelik artan ilgiyi de bu gelişmeler ışığında değerlendirmek daha isabetli olacaktır. Plazma kontrolü, süper iletkenler, lazerler ve ileri malzemelerdeki gelişmeler önemli bir bilimsel birikim oluşturmaktadır. Bununla birlikte bugün ticari ölçekte sürekli net elektrik sağlayan bir füzyon santrali henüz bulunmamaktadır. Bu nedenle bilimsel gelişmeler değerlendirilirken mühendislik, maliyet ve zamanlama konusundaki belirsizlikler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Türkiye açısından önemli olan, füzyonun ticari geleceğinin kesinleşmesini pasif bir şekilde beklemek yerine bu alanda gelişen teknolojilerde bugünden yetkinlik kazanmaktır. Mıknatıslar, güç elektroniği, ileri malzemeler, sensörler, robotik ve dijital kontrol alanlarındaki çalışmalar; farklı stratejik sektörlere de katkı sağlayabilir. Mevcut bilim ve sanayi kapasitemizi doğru değerlendirmek, önceliklerimizi belirlemek ve uluslararası iş birliklerinden somut sonuçlar elde etmek bu açıdan önem taşımaktadır.

Bu raporumuz, füzyon teknolojilerindeki gelişmeleri ve Türkiye'nin önündeki stratejik seçenekleri söz konusu anlayışla ele almaktadır. Millî İstihbarat Akademisi olarak önerdiğimiz stratejik yol

RA -
POR

haritasında, belirli bir reaktör takviminden önce ölçülebilir yetkinliklere ve kanıta dayalı kararlara öncelik verilmiştir. Buradaki amacımız; Türkiye'nin gelecekteki enerji seçeneklerini genişletmesine ve uluslararası füzyon ekosisteminde bilimsel, teknolojik ve endüstriyel açıdan söz sahibi olmasına katkı sağlamaktır.

Prof. Dr. Talha Köse
Millî İstihbarat Akademisi Başkanı

YÖNETİCİ ÖZETİ

- Nükleer füzyon, hafif atom çekirdeklerinin birleşmesiyle açığa çıkan enerjinin kontrollü biçimde kullanılmasına dayanmaktadır. Uzun yıllardır araştırılan bu teknoloji; son dönemde bilimsel ve mühendislik alanındaki ilerlemeler, artan elektrik talebi ve enerji güvenliğine ilişkin kaygılar nedeniyle yeniden önem kazanmıştır.
- Füzyon, uzun vadede güvenilir ve düşük karbonlu elektrik üretimi için yeni bir seçenek oluşturabilir. Türkiye açısından ise gelecekteki enerji seçeneklerini çeşitlendirmenin yanında kritik teknolojilerde yerli yetkinlik geliştirme ile uluslararası araştırma ve sanayi ekosistemine katılma potansiyeli taşımaktadır.
- Bilimsel alandaki tüm ilerlemelere rağmen ticari ölçekte ve kesintisiz füzyon elektriği üreten bir santral henüz bulunmamaktadır. Plazma veya hedef kazancı, tesisin toplam enerji tüketimini karşılaması ve şebekeye net elektrik vermesiyle aynı anlama gelmemektedir.
- Ticarileşme için füzyon reaksiyonunun yanında malzeme dayanımı, trityum üretimi, ısı çıkarma, elektrik dönüşümü, yakıt çevrimi, bakım ve yardımcı sistem tüketimi gibi sorunların birlikte çözülmesi gerekmektedir. Ticari takvimdeki belirsizlik, bu unsurların hangi teknolojiyle ve hangi maliyetle bütünleştirilebileceğine dair soru işaretlerinden kaynaklanmaktadır.
- Manyetik hapsetme sistemleri teknolojik birikim bakımından önde bulunurken eylemsiz hapsetmede bilimsel ateşleme ve hedef kazancı gösterilmiştir. Alternatif manyetik ve hibrit sistemler ise daha kompakt çözümler vadetse de hiçbir yaklaşım, henüz bütünleşik santral işletimini kanıtlamamıştır.
- Füzyon teknolojilerindeki gelişmeler; yüksek alanlı mıknatıslar, ileri malzemeler, lazerler, kriyojenik sistemler, güç elektroniği, robotik ve yapay zekâ gibi alanlarda yeni teknolojik fırsatlar oluşturmaktadır. Bu yetkinliklerin enerji, savunma, uzay ve ileri imalat gibi farklı sektörlerde de kullanılabilmesi, füzyon yatırımlarının ticari elektrik üretiminden önce ekonomik değer üretmesini mümkün kılabilir.
- Füzyonun ticari ve ekonomik açıdan uygulanabilir hâle gelmesi, uzun vadede enerji kaynaklarının coğrafi dağılımına dayanan jeopolitik bağımlılık ilişkilerini dönüştürme ihtimalini de

güçlendirecektir. Ancak geleneksel enerji bağımlılıklarının azalması; kritik reaktör bileşenleri, ileri malzemeler ve üretim teknolojileri etrafında yeni stratejik bağımlılıklar doğurabilir.

- Füzyon ile yapay zekâ arasındaki çift yönlü ilişki, teknopolitik rekabetin yeni dinamiklerinden birini oluşturmaktadır. Yapay zekâ, füzyon araştırmalarını hızlandırırken füzyonun gelecekte ticari başarıya ulaşması, veri merkezlerinin ve ileri hesaplama altyapılarının artan elektrik ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlayabilir.
- Özel füzyon şirketlerinin bildirdiği toplam finansman 2026 itibarıyla 14,24 milyar dolara ulaşmış, son 12 ayda 4,48 milyar dolar yeni kaynak sağlanmıştır. Bu hareketlilik sektörün büyüdüğünü göstermekte ancak yatırım miktarı, şirket değerlemesi ve elektrik alım anlaşmaları; teknik başarının doğrudan kanıtını oluşturmamaktadır.
- Uluslararası rekabet tek bir politika modeli üzerinden ilerlememektedir. ABD rekabetçi kamu-özel mekanizmalarıyla ilerlerken Birleşik Krallık ulusal pilot proje, beceri ve tedarik zincirini; Çin büyük araştırma altyapılarını; Almanya standardizasyon ve ileri imalatı; Japonya hassas üretim, teknoloji çeşitliliği ve tedarik zincirini; Güney Kore ise dijitalleşme ve ihracat kapasitesini öne çıkarmaktadır. Avrupa Birliği (AB) ve Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktörü (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) ise çok taraflı araştırma altyapısı, ortak tedarik ve maliyet paylaşımı modeli sunmaktadır.
- Füzyon ekonomisinin ilk önemli gelirlerinin, santrallerde üretilen elektrikten önce tedarik zincirinde ortaya çıkması beklenmektedir. Reaktör tasarımına sahip olmayan ülkeler de belirli bir malzeme, sensör, mıknatıs, vakum bileşeni, robotik sistem veya mühendislik hizmetinde uluslararası tedarikçi olabilir.
- Füzyon alanındaki uluslararası rekabet; bilimsel ve teknolojik kapasitenin yanında araştırma altyapılarına erişim, kritik bilgi ve fikrî mülkiyetin kontrolü, teknik standartların belirlenmesi ve tedarik zincirlerinde söz sahibi olunması üzerinden şekillenmektedir. Bu nedenle füzyon, enerji ve sanayi politikalarının ötesinde ülkelerin uluslararası teknoloji ekosistemindeki konumunu ve stratejik hareket alanını etkileyebilecek bir teknopolitik rekabet alanıdır.
- Füzyon, Türkiye'nin enerji ithalatını veya elektrik üretim açığını kısa vadede azaltacak bir seçenek değildir. Buna karşılık gelişmekte olan teknoloji ve tedarik ekosisteminin dışında kalınması, enerji bağımsızlığı stratejik hedefine zarar verebilir ve yeni bağımlılıklar üretebilir.
- Türkiye açısından füzyonun stratejik değeri, uzun vadeli enerji güvenliğinin yanı sıra teknolojik özerkliğin güçlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Kritik alt teknolojilerde yerli yetkinlik geliştirilmesi, uluslararası araştırma ve üretim ağlarına nitelikli katılım sağlanması ve teknolojik seçeneklerin bağımsız biçimde değerlendirilebilmesi; Türkiye'nin yeni bağımlılık ilişkilerini yönetmesine ve uluslararası iş birliklerindeki konumunu güçlendirmesine katkı sağlayacaktır.
- Türkiye'de nükleer fizik, hızlandırıcılar, malzeme bilimi, güç elektroniği, lazer, yapay zekâ, robotik ve hassas imalat alanlarında farklı kurumlara dağılmış yetkinlikler bulunmaktadır. Ancak bu kapasitenin füzyon koşullarındaki yeterliliği ve uluslararası standartlara uygunluğu henüz bütüncül biçimde ortaya konulmamıştır.

- Füzyon araştırmaları ulusal politika belgelerinde görünür hâle gelmeye başlamış olsa da bütçesi, takvimi, teknoloji öncelikleri, sorumlu kurumları ve performans göstergeleri belirlenmiş kapsamlı bir ulusal program bulunmamaktadır. Türkiye'nin ITER üyesi olmaması da büyük ortak araştırma altyapılarına doğrudan erişimi sınırlandırmaktadır.
- Türkiye için en dengeli stratejik tercih, uluslararası iş birlikleriyle desteklenen seçici teknoloji geliştirme ve tedarik modelidir. Yakın dönemde, tek bir reaktör mimarisine veya yüksek maliyetli ulusal tesis projesine bağlanmak yerine farklı füzyon sistemlerinin ortak ihtiyaç duyduğu alanlara yatırım yapılmalıdır.
- İleri malzemeler ve nükleer teknolojiler; yüksek alanlı mıknatıslar, kriyojenik ve güç elektroniği; lazer, optik, sensör ve yapay zekâ destekli dijital kontrol; sistem mühendisliği, robotik, vakum ve ileri imalat öncelikli teknoloji kümeleri olarak öne çıkmaktadır.
- İlk politika adımı; Türkiye'deki araştırma altyapısını, insan kaynağını, şirketleri ve uluslararası bağlantıları kapsayan doğrulanabilir bir kapasite envanteri hazırlamak olmalıdır. Yeni laboratuvar ve cihaz yatırımlarına, mevcut altyapıların yeterliliği ve ortak kullanım imkânları değerlendirildikten sonra karar verilmelidir.
- Başlangıç aşamasında yeni ve bağımsız bir kurumsal yapı oluşturmak yerine mevcut bir araştırma kurumu bünyesinde Ulusal Füzyon Programı Koordinasyon Birimi kurulması daha uygulanabilir görünmektedir. Programın stratejik yönlendirmesi ve kurumlar arası eş güdümü mevcut idari mekanizmalar üzerinden sağlanmalı; bilimsel ve teknik değerlendirmeler bağımsız bir Bilim ve Teknoloji Danışma Kurulu tarafından yürütülmelidir.
- Finansman sistemi; temel araştırma, insan kaynağı, uluslararası altyapıya erişim ve sanayi prototipleri için farklı araçlar içermelidir. Üniversite araştırmalarına uzun vadeli destek sağlanırken mühendislik ve sanayi projelerinde sonraki bütçe dilimleri, bağımsız olarak doğrulanan teknik kilometre taşlarına bağlanmalıdır.
- İnsan kaynağı programı; fizikçilerin yanı sıra malzeme bilimcileri, mühendisleri, veri bilimcileri, yazılım geliştiricileri, ileri imalat uzmanlarını ve teknisyenleri kapsamalıdır. Uluslararası ortaklıklar ise araştırmacı ziyaretlerinin ötesine geçerek ortak deney, veri hakkı, fikrî mülkiyet ve yerli bileşenlerin yabancı tesislerde test edilmesi gibi somut çıktılar üretmelidir.
- Türkiye için önerilen yol haritası; 2027-2028 döneminde kapasite envanteri ve programın kurulmasını, 2029-2031 döneminde seçilmiş teknoloji kümelerinde derinleşmeyi, 2032-2035 döneminde ise prototiplerin ürüne ve uluslararası tedarik kapasitesine dönüştürülmesini öngörmektedir. Büyük ölçekli pilot uygulama veya reaktör yatırımı; 2035 sonrasında teknik, ekonomik ve düzenleyici kanıtlar doğrultusunda ele alınmalıdır.
- Program her yıl kamuya açık performans raporu yayımlamalı ve iki yılda bir bağımsız uzman değerlendirmesine tabi tutulmalıdır. Türkiye'nin yakın dönem başarısı; bir reaktör takvimi ilan etmekten ziyade teknolojik seçenekleri bağımsız biçimde değerlendirebilen, kritik bileşenler geliştirebilen ve uluslararası füzyon ekosistemine nitelikli katkı sunabilen kalıcı bir kapasite oluşturmasıyla ölçülmelidir.

GİRİŞ

Nükleer füzyon, hafif atom çekirdeklerinin birleşmesi sırasında açığa çıkan enerjinin denetimli biçimde kullanılmasına dayanır. Güneş ve yıldızların enerji üretim mekanizmasını yeryüzünde yeniden oluşturma düşüncesi, yaklaşık 70 yıldır bilimsel araştırmaların konusudur. Diğer taraftan füzyon uzun süre ticari getirisi uzak bir gelecek teknolojisi olarak görüldüğünden araştırmalar, ağırlıklı olarak büyük kamu laboratuvarları ve uluslararası bilim programları üzerinden ilerlemiştir. Son yıllarda ortaya çıkan gelişmeler ise bu yerleşik değerlendirmeyi kısmen değiştirmeye başlamıştır. Bilimsel deneylerde kaydedilen ilerleme, yüksek sıcaklık süper iletkenlerinin geliştirilmesi, lazer teknolojilerindeki sıçrama, gelişmiş malzeme üretimi, yapay zekâ destekli kontrol sistemleri ve özel sermayenin alana yönelmesi; füzyonun hem teknik hem de stratejik açıdan yeniden değerlendirilmesine yol açmıştır.

Mevzubahis değişimin arkasında tek bir bilimsel başarı bulunmamaktadır. Manyetik hapsetme sistemlerinde plazmanın daha uzun süre ve daha kararlı biçimde kontrol edilmesi, eylemsiz hapsetme deneylerinde ateşleme koşullarına ulaşılması, daha güçlü ve kompakt mıknatısların üretilmesi ve özel şirketlerin farklı reaktör mimarileri geliştirmeye başlaması aynı döneme rastlamıştır. ITER[1] gibi büyük ölçekli uluslararası projeler ile EAST,[2] KSTAR,[3] JT-60SA[4] ve National Ignition Facility (NIF)[5] gibi deneysel altyapılardan elde edilen sonuçlar, füzyon fiziğinin temel sorunlarına ilişkin bilgi birikimini genişletmiştir. Özel girişimler ise daha küçük ölçekli, hızlı inşa edilebilen ve ticari kullanıma daha yakın sistemler geliştirme iddiasıyla yeni bir hareket alanı oluşturmuştur. Bu gelişmeler, teknik başarının veya ekonomik uygulanabilirliğin güvence altına alındığı anlamına gelmemekle birlikte füzyonun, artık yalnızca sınırlı sayıdaki fizik laboratuvarının araştırma alanından ibaret olmadığını da ortaya koymaktadır.

Füzyon alanındaki ilerlemenin doğru değerlendirilebilmesi için bilimsel başarı ile ticari enerji üretimi arasındaki farkın korunması gerekir. Bir plazmada yüksek enerji kazancına ulaşılması, bir yakıt kapsülünden kendisine aktarılan enerjiden daha fazla füzyon enerjisi elde edilmesi veya bir deney düzeneğinde füzyon reaksiyonunun tekrarlanabilmesi önemli bilimsel eşiklerdir. Ancak bu sonuçlar, tesisin kendi enerji ihtiyacını karşılayarak elektrik şebekesine kesintisiz ve ekonomik enerji sağladığını göstermez. Ticari bir füzyon santrali işletmek; plazma veya hedef kazancının yanı sıra yakıt çevrimi,

ısı çıkarma, elektrik dönüşümü, malzeme dayanımı, bakım, güvenilirlik ve maliyet gibi çok sayıda sorunun birlikte çözülmesini gerektirir. Bu nedenle füzyon çalışmalarına ilişkin her değerlendirmede deneysel sonuçlar, şirket hedefleri, mühendislik gösterimleri ve ticari santral beklentileri birbirinden ayrılmalıdır.

Günümüzde füzyonun taşıdığı önem, gelecekte üretebileceği elektrikle sınırlı değildir. Yüksek sıcaklık süper iletkenleri, ileri malzemeler, kriyojenik sistemler, yüksek güçlü lazerler, güç elektroniği, vakum teknolojileri, radyasyon ölçümü, robotik, hassas imalat ve yapay zekâ destekli kontrol; füzyon sistemlerinin ortak ihtiyaçları arasında yer almaktadır. Bu teknolojilerin birçoğu enerji, savunma, uzay, sağlık, ulaşım ve ileri imalat gibi farklı sektörlerde kullanılabilecek niteliktedir. **Dolayısıyla füzyona yönelik yatırımlar, ticari bir santralin devreye gireceği tarihten önce de bilimsel yetkinlik, sanayi kapasitesi ve nitelikli istihdam oluşturabilir. Birleşik Krallık, ABD, Almanya, Çin, Japonya ve Güney Kore gibi ülkelerin son dönemde açıkladıkları programlarda araştırma altyapısının yanında tedarik zincirleri, insan kaynağı, özel sektör, düzenleme ve uluslararası iş birliklerine yer verilmesi bu yaklaşımın sonucudur.**

Uluslararası rekabetin yönü de buna bağlı olarak değişmektedir. Yarış, yalnızca ilk çalışan füzyon santralini kurma hedefi üzerinden şekillenmemektedir. Gelecekteki santrallerin ihtiyaç duyacağı malzemeleri, mıknatısları, lazerleri, yakıt sistemlerini, sensörleri, kontrol yazılımlarını ve bakım teknolojilerini kimin geliştireceği sorusu giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Füzyon santrallerinin ticari geleceği ve baskın reaktör mimarisi henüz kesinleşmemiş olsa da bu sistemlerin dayanacağı mühendislik yetkinlikleri büyük ölçüde görünür hâle gelmiştir. Bu durum, kendi ulusal reaktör programına sahip olmayan ülkeler için de yeni bir katılım alanı açmaktadır. Füzyon ekonomisinde yer almak, bütün bir santrali tasarlayıp inşa edebilme kapasitesiyle sınırlı değildir; kritik bir malzemeyi, bileşeni veya mühendislik hizmetini uluslararası standartlarda sağlayabilmek de stratejik değer üretmektedir.

Söz konusu bağlamda füzyon, gelecekteki enerji üretim kapasitesinin ötesinde, yeni teknopolitik düzenin şekillenmesinde etkili olabilecek olası stratejik alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bilimsel bilgi üretimi, kritik teknolojilerin geliştirilmesi, araştırma altyapılarına erişim ve teknik standartların belirlenmesi; ülkelerin uluslararası teknoloji ekosistemindeki konumunu ve stratejik hareket alanını etkilemektedir. **Dolayısıyla füzyonun stratejik önemi; enerji üretiminde yaratabileceği dönüşüm kadar bu dönüşümü mümkün kılacak teknolojiler, bilgi ağları ve üretim kabiliyetleri üzerinde hangi aktörlerin belirleyici olacağıyla da ilişkilidir.**

Türkiye açısından füzyonun, kısa vadede enerji ithalatını azaltacak veya elektrik üretim açığını kapatacak bir seçenek olarak değerlendirilmesi gerçekçi değildir. Ülkenin enerji talebi, dışa bağımlılığı ve düşük karbonlu üretim hedefleri; daha yakın dönem için yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, şebeke yatırımları, depolama ve nükleer fisyon gibi mevcut seçeneklerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Buna rağmen füzyon teknolojilerinin 2030'lu ve 2040'lı yıllarda oluşturabileceği yeni bilimsel ve endüstriyel ekosistemin dışında kalmak, ilerleyen dönemde yeni bir teknoloji ve ekipman bağımlılığı

doğurabilir. Türkiye'nin enerji alanındaki dışa bağımlılığıyla ileri teknoloji ürünlerindeki ithalat ihtiyacı birlikte düşünüldüğünde, füzyonun sadece gelecekteki elektrik üretimi açısından ele alınması yetersiz kalmaktadır.

Türkiye, bugün bulunduğu konum itibarıyla uluslararası rekabete hazırlıksız bir ülke değildir. **Nükleer fizik, hızlandırıcılar, malzeme bilimi, bor ve nadir toprak elementleri teknolojileri, güç elektroniği, savunma sanayisi, hassas üretim, yazılım ve yapay zekâ gibi alanlarda farklı kurumlara dağılmış derin bilgi ve stratejik altyapılar bulunmaktadır.** Temel sorun, bu kapasitenin füzyon gibi uzun vadeli ve disiplinler arası bir teknoloji programı etrafında henüz sistematik biçimde bir araya getirilmemiş olmasıdır. Kamuya açık politika belgelerinde füzyon araştırmalarına yer verilmeye başlanmış olsa da bütçesi, takvimi, sorumlu kurumları, teknoloji öncelikleri ve ölçülebilir performans göstergeleri belirlenmiş bütüncül bir ulusal yol haritası bulunmamaktadır. **Bu durum, hangi kabiliyetlerin mevcut olduğunu ve hangi alanlarda gerçekçi bir üstünlük oluşturulabileceğini belirleyecek kapsamlı bir değerlendirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.**

Raporun temel sorusu bu noktada şekillenmektedir. Füzyon enerjisinin ticari geleceği, baskın reaktör mimarisi ve devreye girme takvimi henüz kesinleşmemişken Türkiye hangi bilimsel, teknolojik ve kurumsal kapasitelere yatırım yapmalıdır? Bu çalışmada söz konusu soruya cevap aranırken tek bir teknoloji veya şirket seçimine dayanan yaklaşım yerine farklı füzyon sistemlerinin ortak ihtiyaçlarını esas alan bir kapasite portföyü benimsenmektedir. İleri malzemeler, yüksek alanlı mıknatıslar, kriyojenik sistemler, güç elektroniği, lazer ve optik teknolojileri, sensörler, yapay zekâ destekli kontrol, robotik ve hassas imalat bu portföyün başlıca unsurlarıdır. **Bu minvalde bir yaklaşım, füzyonun beklenenden geç ticarileşmesi hâlinde dahi oluşturulan altyapı ve insan kaynağının diğer stratejik sektörlerde kullanılmasına olanak sağlayacaktır.**

BÖLÜM 1

FÜZYON ENERJİSİNDE TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM

Füzyonun enerji teknolojisine dönüşebilmesi, çekirdeklerin birleşmesini mümkün kılan fiziksel koşulların kurulmasının ötesinde, bu koşulların kararlı ve tekrarlanabilir biçimde sürdürülebilmesine bağlıdır. Çekirdeklerin birbirine yeterince yaklaşabilmesi için elektriksel itmenin aşılması, bunun için de yakıtın çok yüksek sıcaklıklara çıkarılarak plazma hâline getirilmesi ve yeterli yoğunlukta yeterince uzun süre bir arada tutulması gerekir. Sıcaklık, yoğunluk ve enerji hapsi süresi arasındaki bu ilişki, füzyon araştırmalarının bilimsel temelini oluşturduğu kadar laboratuvar başarısıyla ticari santral arasındaki mesafeyi de açıklamaktadır. Bu nedenle reaksiyonun başlatılması tek başına yeterli değildir. Sistemin; enerji dengesi açısından anlamlı, güvenilir ve sürdürülebilir bir işletme düzenine ulaşması gerekmektedir.

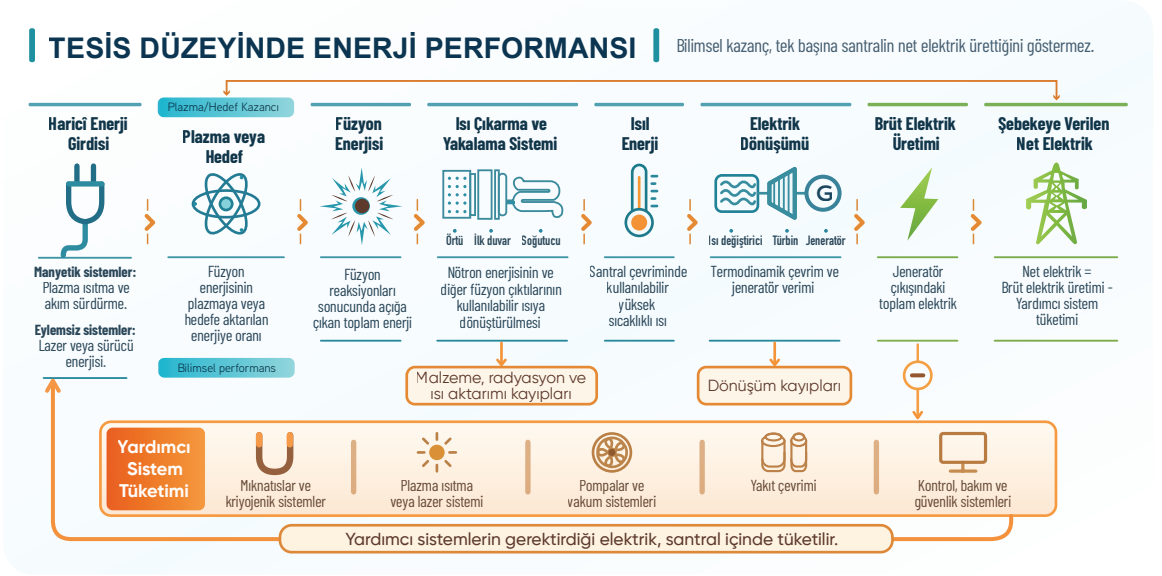
Son dönemdeki gelişmeler, füzyon fiziğinin temel ilkelerini değiştirmemiş ancak bu ilkeleri uygulanabilir bir enerji sistemine dönüştürebilecek araçların gelişmesini sağlamıştır. Daha güçlü süper iletken mıknatıslar, yüksek hassasiyetli lazerler, gelişmiş plazma tanı sistemleri, hızlı güç elektroniği, yeni nesil malzemeler ve yüksek başarımlı hesaplama altyapıları aynı dönemde ilerlemiştir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi ise plazma davranışının tahmin edilmesi, deneylerin gerçek zamanlı kontrolü, malzeme keşfi ve karmaşık reaktör tasarımlarının optimize edilmesi gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Böylece füzyon araştırmaları, tek bir fizik problemini çözmeye odaklanan laboratuvar çalışmalarından çok sayıda mühendislik alanını bir araya getiren bütünleşik sistem programlarına doğru yönelmiştir.

Bahsi geçen dönüşüm önemli olmakla birlikte ticari olgunluğun ölçülmesinde dikkatli bir yaklaşım gerektirir. Füzyon alanında kullanılan kazanç kavramı, hesaplamaya hangi enerji girdilerinin dâhil edildiğine göre farklı anlamlara gelebilmektedir. Manyetik hapsetme deneylerinde kullanılan plazma kazancı, füzyon gücünün plazmaya aktarılan haricî ısıtma gücüne oranını ifade eder. Eylemsiz hapsetmede hedef kazancı, yakıt kapsülünden elde edilen füzyon enerjisinin kapsüle ulaşan lazer enerjisine oranıdır. Tesis kazancı ise mıknatıslar, lazerler, kriyojenik sistemler, pompalar, soğutma ve diğer yardımcı sistemler dâhil olmak üzere bütün tesisin enerji bilançosunu kapsar. Ticari bir santral açısından son ölçüt, üretilen elektriğin tesisin kendi tüketimini karşılaması ve şebekeye güvenilir biçimde net elektrik sağlayabilmesidir (bk. İnfografik 1).

Füzyon alanının kazançlarına dair yapılan ayrım, farklı başarı düzeylerinin birbirine karıştırılmasını önlemek için gereklidir. Bir deneyin bilimsel ateşleme eşiğini aşması, füzyon reaksiyonunun öngörülen fiziksel koşullarda gerçekleştirilebildiğini gösterir. Ticari santral ise bu sonucu yüksek güvenilirlik, uzun işletme süresi, sürdürülebilir yakıt çevrimi, kabul edilebilir bakım ihtiyacı ve rekabetçi maliyetle tekrarlamak zorundadır. **Füzyonun geleceğini belirleyecek asıl eşik, ayrı ayrı başarılmış bilimsel sonuçların tek bir tesis içinde ve eş zamanlı olarak bir araya getirilmesidir.**

Füzyon araştırmalarının büyük bölümü döteryum ve trityum çekirdeklerinin birleşmesine dayanan reaksiyona odaklanmaktadır. Bunun temel nedeni, söz konusu reaksiyonun diğer füzyon yakıtlarına kıyasla daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek reaksiyon olasılığı sunmasıdır. Reaksiyon sonucunda bir

İnfografik 1: Füzyon Reaksiyonundan Net Elektrik Üretimine Uzanan Enerji Zinciri



helyum çekirdeği ile yaklaşık 14 MeV enerjili bir nötron açığa çıkar.[6] Enerjinin büyük bölümü nötron tarafından taşındığı için gelecekteki bir santralde nötronların enerjisinin reaktörü çevreleyen örtü (reaktör örtüsü) yapısında ısıya, ardından klasik bir güç çevrimi aracılığıyla elektriğe dönüştürülmesi öngörülmektedir.

Bu yaklaşım, füzyon fiziğinin başarısını doğrudan elektrik üretimine çevirmeyi güçleştiren ilk mühendislik sorununu ortaya çıkarmaktadır. Yüksek enerjili nötronlar; reaktörün yapısal malzemelerinde atomik yer değiştirmelere, şişmeye, gevrekleşmeye ve mekanik özelliklerin zaman içinde bozulmasına yol açabilir. Aynı nötronların lityum içeren bir örtü içinde kullanılarak santralin ihtiyaç duyduğu trityumu üretmesi beklenmektedir. Bunun sonucunda reaktör duvarı; yakıt üretimi, ısı çıkarma ve radyasyon zırhlama görevlerini aynı anda yerine getiren karmaşık bir mühendislik sistemine dönüşmektedir. Plazmada füzyon reaksiyonu elde edilmesi bu zincirin başlangıcını oluştururken ticari kullanılabilirlik, zincirin bütün halkalarının birlikte çalışmasına bağlıdır.

Son yıllarda elde edilen sonuçların önemi de bu çerçevede değerlendirilmelidir. Deneysel sistemler artık yalnızca anlık ve yüksek sıcaklıklı plazmalar oluşturmaya odaklanmamaktadır. Bunun dışında plazmanın daha uzun süre kontrol edilmesi, deneylerin tekrarlanabilirliği, malzeme-plazma etkileşimi, ısı yüklerinin yönetimi ve bakım yapılabilirlik gibi santral ölçeğine daha yakın sorunları incelemektedir. Bilimsel hedef ile mühendislik hedefinin giderek birbirine yaklaşması, füzyon araştırmalarındaki temel değişimlerden biridir. Bununla birlikte günümüzde hiçbir tesis; plazma performansı, trityum üretimi, malzeme ömrü, ısıdan elektrik üretimi, bakım ve ekonomik işletme koşullarını aynı sistem içinde sağlayamamıştır.

Manyetik Hapsetme Füzyonu

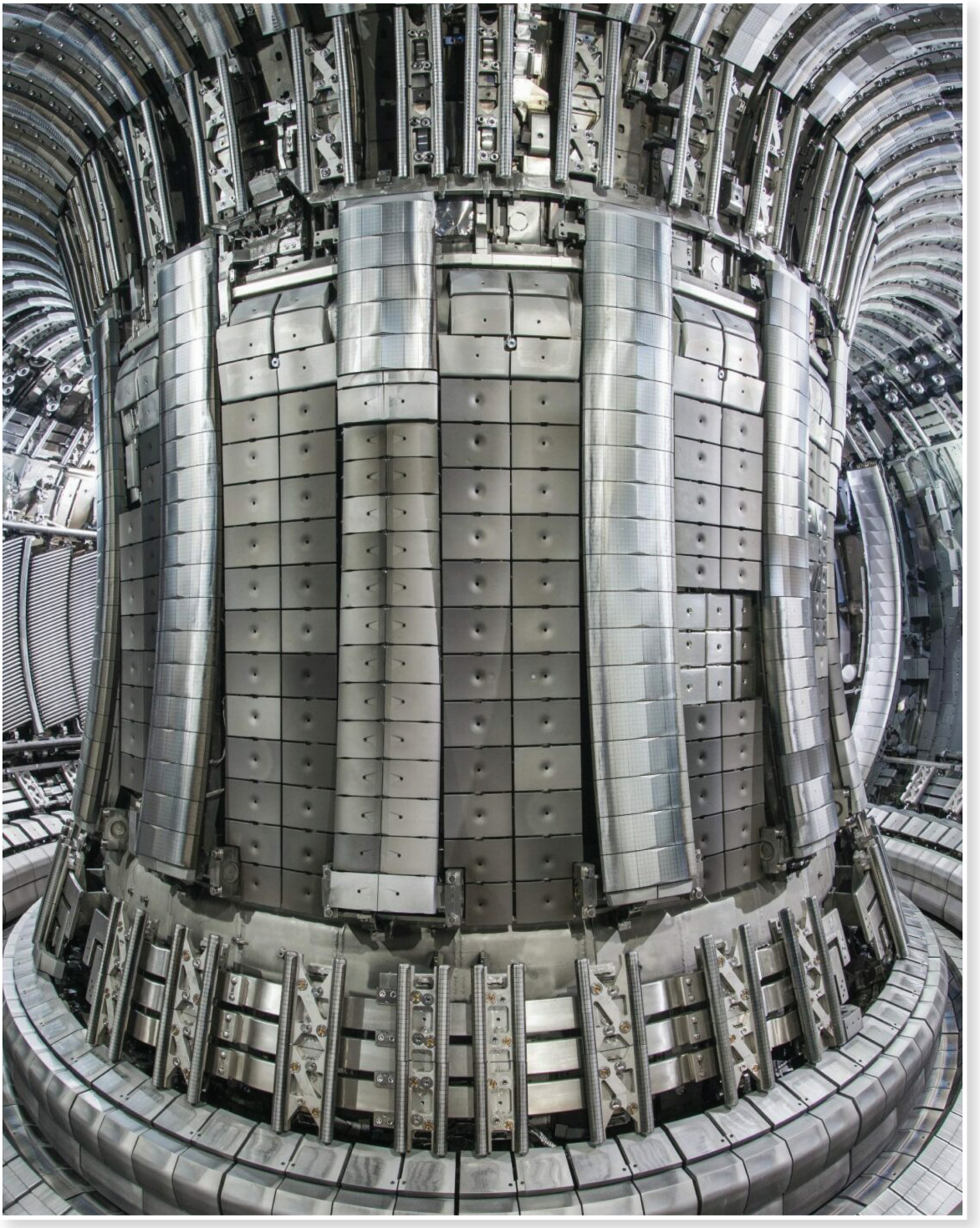
Manyetik hapsetme yaklaşımında, çok yüksek sıcaklıktaki plazmanın reaktör duvarlarıyla doğrudan temas etmesini önlemek için güçlü manyetik alanlardan yararlanılır.[7] Elektrik yüklü parçacıklar manyetik alan çizgileri boyunca hareket ettiğinden uygun bir manyetik geometri, plazmanın belirli bir hacim içinde tutulmasını sağlar. Bu yaklaşımın en bilinen örneği tokamaktır (bk. Fotoğraf 1). Tokamaklarda plazma, halka biçimindeki bir vakum kabı içinde toroidal ve poloidal manyetik alanların birleşimiyle hapsedilir. Plazma akımı hem hapsedilme düzeninin bir parçasını oluşturur hem de plazmanın ısıtılmasına katkı sağlar.

Tokamakların güçlü yönü; onlarca yıllık deneysel birikime, kapsamlı bir bilimsel literatüre ve büyük ölçekli uluslararası altyapılara dayanmasıdır. Plazma sıcaklığı, yoğunluğu, kararlılığı ve enerji hapsi bakımından en ileri sonuçların önemli bölümü tokamak sistemlerinde elde edilmiştir. Ancak plazma akımına dayalı yapı, kesintisiz işletmeyi ve kararlılığın korunmasını güçleştirebilmektedir. Ani plazma sonlanmaları, türbülans, enerji ve parçacıkların reaktör duvarlarına taşınması, yüksek ısı akısının divertör bölgesinden uzaklaştırılması ve uzun süreli akım sürdürme ihtiyacı başlıca sorunlar arasında yer almaktadır.

Manyetik hapsetmenin diğer önemli yaklaşımı stellaratör sistemleridir. Stellaratörler, plazmayı hapseden karmaşık üç boyutlu manyetik alanı büyük ölçüde dış mıknatıslarla oluşturur.[8] Plazma içinde yüksek bir akıma daha az ihtiyaç duyulması, sürekli işletme ve ani plazma sonlanmalarının azaltılması bakımından avantaj sağlayabilir. Diğer taraftan mıknatıs geometrisinin karmaşıklığı, üretim hassasiyeti, bakım ve maliyet; önemli mühendislik güçlükleri doğurmaktadır. Hesaplama kapasitesindeki artış ve ileri üretim teknikleri, geçmişte tasarlanması ve üretilmesi son derece zor olan stellaratör geometrilerinin daha gerçekçi biçimde geliştirilmesine imkân vermiştir. Bu nedenle tokamaklar teknolojik olgunluk bakımından önde bulunurken stellaratörler, uzun süreli işletme potansiyeli açısından yeniden önem kazanmıştır.

Manyetik hapsetme alanındaki en büyük uluslararası proje ITER'dir. ITER'in amacı elektrik üretmek veya şebekeye enerji satmak yerine reaktör ölçeğinde yanan plazmanın bilimsel ve mühendislik koşullarını ortaya koymaktır. Projenin temel hedefi, yaklaşık 50 MW haricî plazma ısıtmasına karşılık 500 MW füzyon gücüne ulaşarak plazma kazanç faktörünü Q≥10 düzeyine çıkarmaktır. Buradaki Q değeri, füzyon gücünün plazmaya dışarıdan aktarılan ısıtma gücüne oranıdır. Mıknatıslar, kriyojenik sistemler, pompalar ve diğer tesis sistemlerinin elektrik tüketimi bu hesaplamaya dâhil edilmemektedir. Dolayısıyla ITER'in hedeflediği sonuç, net elektrik üretiminden önce gelen ve yanan plazma fiziğinin doğrulanmasını amaçlayan bir aşamadır. ITER'in güncellenen takvimine göre araştırma operasyonlarının 2034'te başlaması, tam manyetik enerjiye 2036'da ulaşılması ve döteryum-trityum operasyonlarının 2039'da devreye alınması öngörülmektedir.[9] Takvimde meydana gelen gecikmeler; büyük ölçekli füzyon projelerinde üretim toleransları, kalite kontrol, bileşen entegrasyonu ve uluslararası proje yönetiminin en az plazma fiziği kadar belirleyici olduğunu göstermiştir. ITER'in bilimsel hedefi önemini korumakla birlikte proje, füzyonun ticari takvimi konusunda ihtiyatlı olunması gerektiğini de ortaya koymaktadır.

Fotoğraf 1: İngiltere'nin Culham Bölgesindeki JET Tokamağının İç Görünümü



Kaynak: UKAEA, EUROfusion.

Çin'in EAST cihazında 20 Ocak 2025 tarihinde yüksek hapsedilme rejiminin 1.066 saniye boyunca sürdürülmesi, uzun süreli plazma işletimi bakımından önemli bir sonuçtur.[10] Güney Kore'nin KSTAR programı yüksek sıcaklıklı plazmanın daha uzun süre korunmasına, Japonya'daki JT-60SA ise büyük ölçekli süper iletken tokamak operasyonlarına odaklanmaktadır. Bu deneyler elektrik üretmemekte, gelecekteki reaktörlerde gerekli olacak kararlılık, kontrol, plazma-duvar etkileşimi ve sürekli işletme bilgilerini geliştirmektedir. Deneylerin başarıları, tek bir sıcaklık veya süre rekorundan ziyade bu koşulların güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde oluşturulmasına yaptıkları katkı üzerinden değerlendirilmelidir.

Manyetik hapsetme alanındaki bir diğer değişim, yüksek sıcaklık süper iletkenlerinin daha güçlü manyetik alanlar üretebilmesiyle daha kompakt cihazların gündeme gelmesidir. Güçlü manyetik alan, belirli koşullarda daha küçük plazma hacminde daha yüksek performans elde edilmesine imkân verebilir. Commonwealth Fusion Systems tarafından geliştirilen SPARC tokamağı, bu yaklaşımın öne çıkan örneklerinden biridir.[11] Bununla birlikte cihaz boyutunun küçülmesi, bütün mühendislik sorunlarının aynı oranda azalmasını sağlamaz. Nötron akısı, ısı yükü, trityum üretimi, bakım için ayrılması gereken alan ve santral bileşenlerinin korunması, kompakt tasarımlarda daha da yoğunlaşabilir. Yüksek alanlı mıknatıslar tokamakların ölçek ve maliyet yapısını değiştirme potansiyeline sahip olsa da bu potansiyelin, bütünleşik santral koşullarında doğrulanması gerekmektedir.

Manyetik hapsetme füzyonu, mevcut bilgi birikimi ve deneysel altyapı bakımından ticari santral hedefine en yakın teknoloji ailesi olarak değerlendirilmektedir. Buna rağmen bugüne kadar hiçbir manyetik sistem; döteryum-trityum yakıtıyla sürekli çalışmayı, kendi trityumunu üretmeyi, ortaya çıkan ısıyı elektriğe dönüştürmeyi ve reaktör bileşenlerini kabul edilebilir aralıklarla değiştirmeyi tek bir tesis bünyesinde gerçekleştirememiştir. Bu nedenle manyetik hapsetmenin görece ileri konumu, ticari riskin ortadan kalktığı anlamına gelmemekte; riskin temel fizik konularından bütünleşik mühendislik ve ekonomi alanına doğru yer değiştirdiğini göstermektedir.

Eylemsiz Hapsetme ve Lazer Füzyonu

Eylemsiz hapsetme füzyonunda büyük bir plazma uzun süre manyetik alanlarla tutulmaz, bunun yerine milimetre ölçeğindeki bir yakıt kapsülü çok kısa sürede sıkıştırılır.[12] Yüksek güçlü lazerler veya başka sürücüler, kapsülün dış yüzeyini ani biçimde ısıtır. Dış tabakanın dışarı doğru genişlemesiyle oluşan tepki kuvveti, kapsülün iç kısmını merkeze doğru sıkıştırır. Yeterli simetri, yoğunluk ve sıcaklığa ulaşılması hâlinde kapsülün merkezinde füzyon reaksiyonları başlar. Yakıt kendi ataleti sayesinde birkaç nanosaniye boyunca bir arada kaldığı için bu yaklaşım eylemsiz hapsetme olarak adlandırılmaktadır.

ABD'deki NIF, bu alandaki en önemli deneysel altyapıdır. NIF, Aralık 2022'de ilk kez hedefe aktarılan lazer enerjisinden daha yüksek füzyon enerjisi elde ederek bilimsel ateşleme eşiğini geçmiştir. Daha sonraki deneylerde sonuç tekrarlanmış ve 7 Nisan 2025 tarihli atışta hedefe ulaşan 2,08 MJ lazer enerjisine karşılık 8,6 MJ füzyon enerjisi elde edilmiştir. Bunun sonucunda hedef kazancı yaklaşık 4,13 düzeyine ulaşmıştır.[13] Bu sonuç, laboratuvar ortamında küçük bir yakıt kapsülünün kendi ölçeğinde

ateşlenebildiğini ve füzyon reaksiyonlarının kapsülü daha fazla ısıtarak enerji üretimini büyütebildiğini göstermesi bakımından önemli bir bilimsel dönüm noktasıdır. NIF deneyinin enerji santrali olarak yorumlanması ise yanıltıcı olacaktır. Hedefe ulaşan lazer enerjisi, tesisin elektrik şebekesinden çektiği toplam enerjinin yalnızca bir bölümüdür. Lazerlerin üretilmesi, optik sistemler, soğutma, vakum ve diğer yardımcı donanımlar için hedefe gönderilen enerjiden çok daha fazla elektrik kullanılmaktadır. Ancak NIF, sürekli elektrik üretmek üzere tasarlanmış bir tesis de değildir. Deneysel atışlar arasında hedefin yerleştirilmesi, cihazların kontrol edilmesi ve sistemin yeniden hazırlanması gerekir. Dolayısıyla hedef kazancının 1'in üzerine çıkması, net tesis kazancının veya elektrik üretiminin pozitif olduğu anlamına gelmemektedir.

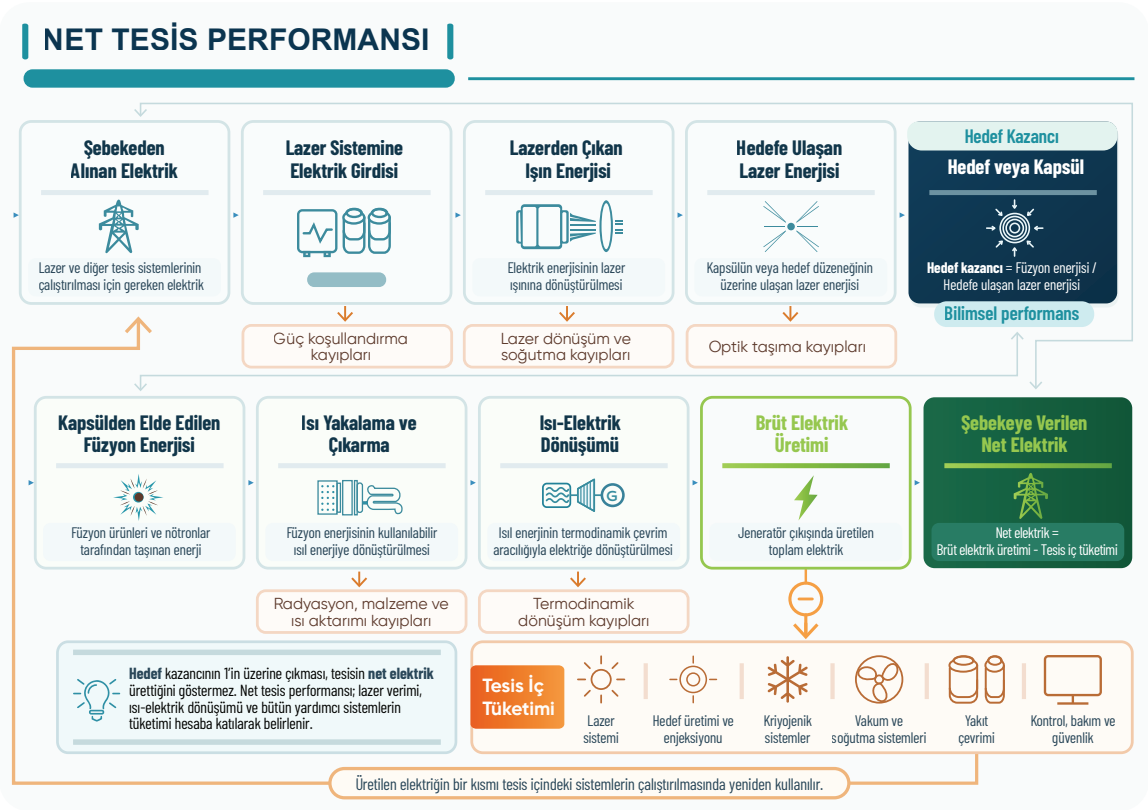
Füzyon araştırmalarının ulusal güvenlikle kesiştiği alanlar da bulunmaktadır. ABD'deki NIF, füzyon fiziğine yönelik çalışmalarının yanında, nükleer silah stokunun güvenilirliğinin yer altı nükleer denemelerine başvurulmadan değerlendirilmesini amaçlayan araştırmalara da hizmet etmektedir. **Bu örnek, yüksek enerjili lazerler, ileri simülasyon yöntemleri ve aşırı koşullardaki malzeme davranışı gibi kabiliyetlerin enerji araştırmalarıyla stratejik güvenlik araştırmaları arasında ortak bir teknolojik zemin oluşturabildiğini ortaya koymaktadır**.[14]

Eylemsiz füzyonun enerji teknolojisine dönüşebilmesi için dört sorunun birlikte çözülmesi elzemdir. İlk olarak lazer veya diğer sürücü sistemlerinin elektrikten hedefe enerji aktarım verimi önemli ölçüde yükselmelidir. İkinci olarak milimetre ölçeğindeki yakıt kapsülleri çok yüksek hassasiyetle, düşük maliyetle ve seri biçimde üretilebilmelidir. Üçüncü olarak bu hedeflerin reaktör odasına saniyede birkaç kez yerleştirilmesi ve hareket hâlindeyken doğru noktadan vurulması gerekir. Son olarak füzyon patlamalarının oluşturduğu nötron, ısı ve mekanik yükleri karşılayabilecek, aynı zamanda trityum üretimi ile ısı çıkarma işlevlerini sürdürebilecek bir reaktör odası geliştirilmelidir.

Bahsi geçen sorunların her biri ayrı ayrı önemli araştırma alanlarıdır. Lazer veriminin artırılması; diyot pompalı lazerler, hızlı optik sistemler, hassas hedef üretimi, yüksek hızlı görüntüleme, radyasyona dayanıklı malzemeler ve otomatik hedef besleme gibi teknolojilerde ilerlemeye bağlıdır. Tek bir başarılı atışın ticari karşılığı sınırlıyken aynı sonucun günün her saatinde binlerce kez güvenilir biçimde tekrarlanabilmesi santral açısından belirleyicidir. Eylemsiz füzyonda bilimsel kanıtın ortaya çıkmış olması, bu yöntemi ciddi bir enerji seçeneği hâline getirmiştir. Ancak gerekli tekrar oranı, tesis verimi ve maliyet düzeyi henüz deneysel olarak ortaya konulamamıştır.

Eylemsiz hapsetme sistemlerinin ticari takvimi bu nedenle manyetik hapsetmeden farklı bir belirsizlik taşımaktadır. Manyetik sistemlerde uzun süreli plazma ve bütünleşik reaktör bileşenleri öne çıkarken eylemsiz sistemlerde yüksek frekanslı ve düşük maliyetli tekrarlı çalışma belirleyici olmaktadır. NIF sonuçları temel fiziğin önemli bir bölümünü doğrulamış fakat enerji santralinin gerektirdiği endüstriyel işletme düzeni henüz kurulmamıştır. Önümüzdeki dönemde yapılacak çalışmaların değeri, tek atışta daha yüksek enerji elde edilmesinden ziyade verimlilik ve tekrar oranında sağlanacak gelişmelerle ölçülecektir. Eylemsiz füzyonda hedef kazancı ile net tesis kazancı arasındaki fark İnfografik 2'de gösterilmektedir.

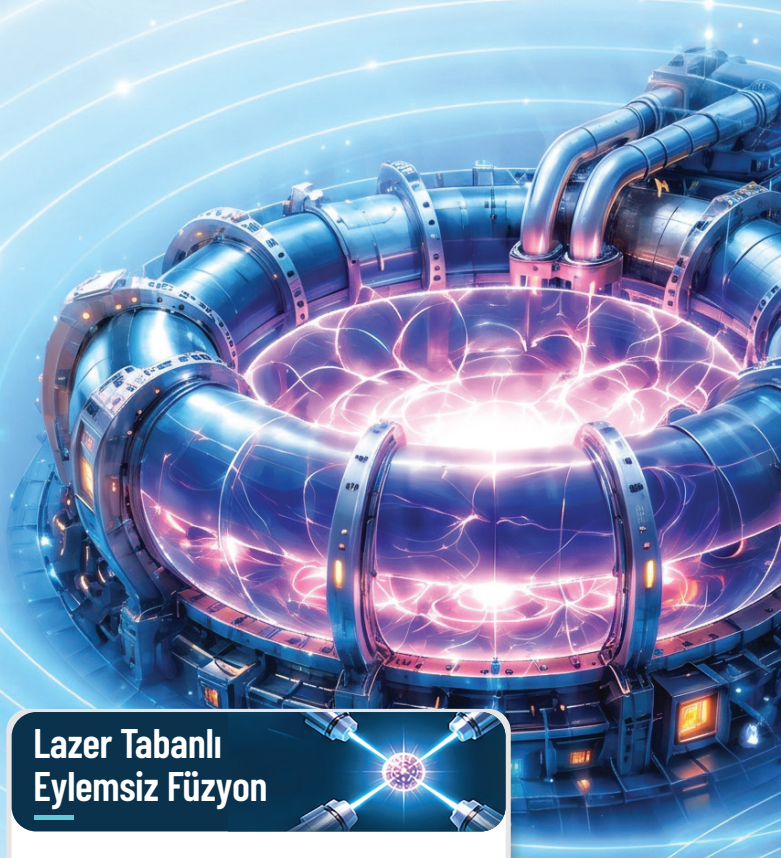
İnfografik 2: Eylemsiz Füzyonda Hedef Kazancı ile Net Tesis Kazancı Arasındaki Fark



Alternatif ve Gelişmekte Olan Füzyon Yaklaşımları

Uluslararası füzyon araştırmaları tokamak, stellaratör ve lazer sistemleriyle sınırlı değildir. Alan-tersi konfigürasyonlar, manyetik aynalar, Z-pinch sistemleri, yoğun plazma odağı, darbeli manyetik sistemler ve manyeto-eylemsiz hibritler gibi farklı yaklaşımlar da geliştirilmektedir.[15] Bu tasarımların ortak amacı; daha basit bir reaktör geometrisi, daha düşük sermaye maliyeti, doğrudan enerji dönüşümü veya daha hızlı prototipleme gibi avantajlar elde etmektir. Her yaklaşım; plazmanın oluşturulması, sıkıştırılması ve hapsedilmesi için farklı bir fiziksel mekanizma kullanmakta ve buna bağlı olarak kendine özgü mühendislik sorunları taşımaktadır.

Alan-tersi konfigürasyonlarda plazma, kendi akımları ve dış manyetik alanların birleşimiyle kompakt bir yapı içinde tutulur. Manyetik ayna sistemleri, parçacıkları manyetik alanın güçlü olduğu uç bölgelerden geri yansıtarak doğrusal bir geometri içinde hapsetmeyi amaçlar. Z-pinch ve yoğun plazma odağı yaklaşımlarında yüksek elektrik akımlarının oluşturduğu manyetik basınç plazmayı sıkıştırır. Manyeto-eylemsiz sistemler ise manyetik hapsin yakıt içindeki ısı kayıplarını azaltma avantajıyla eylemsiz sıkıştırmanın yüksek yoğunluğunu birleştirmeye çalışır. Bu yöntemlerin bazıları daha kompakt cihazlara ve daha kısa geliştirme döngülerine imkân verebilir. Diğer taraftan plazma kararlılığı, tekrarlanabilirlik, bileşen ömrü ve toplam enerji bilançosu henüz santral düzeyinde doğrulanmış değildir.



Tokamak

Mevcut kanıt düzeyi	Yüksek sıcaklık, gelişmiş plazma performansı ve uzun atımlı işletme deneyleri
Güçlü yönü	En geniş deneysel birikim ve uluslararası altyapı
Temel mühendislik sorunu	Plazma kararlılığı, trityum çevrimi, nötron hasarı, ısı çıkarma ve bakım
Ticarileşme değerlendirmesi	En ileri teknoloji ailesidir ancak bütünleşik elektrik üretimi henüz gösterilmemiştir.

Stellaratör

Mevcut kanıt düzeyi	Gelişmiş plazma deneyleri ve optimize edilmiş manyetik geometriler
Güçlü yönü	Sürekli işletme potansiyeli ve düşük plazma akımı
Temel mühendislik sorunu	Karmaşık mıknatıs tasarımı, üretim, maliyet ve bakım
Ticarileşme değerlendirmesi	Uzun süreli işletme açısından güçlü bir seçenek; santral entegrasyonu erken aşamadadır.

Lazer Tabanlı Eylemsiz Füzyon

Mevcut kanıt düzeyi	Bilimsel ateşleme ve hedef kazancı gösterilmiştir.
Güçlü yönü	Yüksek anlık enerji yoğunluğu ve gösterilmiş hedef kazancı
Temel mühendislik sorunu	Lazer verimi, düşük maliyetli hedef, hızlı tekrar ve reaktör odası
Ticarileşme değerlendirmesi	Endüstriyel tekrar ve tesis kazancı henüz gösterilmemiştir.

Darbeli ve Manyeto-Eylemsiz Sistemler

Mevcut kanıt düzeyi	Cihaz ve yaklaşım bazında farklı deneysel sonuçlar
Güçlü yönü	Kompaktlık ve hızlı prototipleme potansiyeli
Temel mühendislik sorunu	Tekrarlanabilirlik, bileşen ömrü ve net enerji bilançosu
Ticarileşme değerlendirmesi	Yüksek potansiyel ile yüksek teknik belirsizlik birlikte bulunmaktadır.

Işın-Hedef ve Malzeme Temelli Sistemler

Mevcut kanıt düzeyi	Ölçülebilir nükleer reaksiyonlar ve malzeme etkileri
Güçlü yönü	Görece erişilebilir deney düzenekleri ve yan uygulamalar
Temel mühendislik sorunu	Reaksiyon hızının güç üretimi için çok düşük kalması
Ticarileşme değerlendirmesi	Nükleer bilim ve kompakt kaynaklar bakımından değerlidir; enerji üretimi perspektifi ise erken aşamadadır.

Alternatif tasarımların önemli bir bölümü özel şirketler tarafından geliştirildiği için teknik bilgiler; çoğu zaman şirket açıklamaları, sınırlı hakemli yayınlar veya henüz bütünleşik olmayan alt sistem deneyleri üzerinden kamuoyuna ulaşmaktadır. Bu durum, teknolojilerin değersiz olduğu anlamına gelmez ancak kanıt düzeylerinin dikkatle sınıflandırılmasını gerektirmektedir. Bir cihazda plazma oluşturulması, füzyon ürünlerinin ölçülmesi, pozitif plazma kazancı, pozitif tesis kazancı ve net elektrik üretimi farklı aşamalardır. Şirketlerin açıkladığı takvimler, yatırım ve mühendislik hedefi olarak değerlendirilmeli; gerçekleşmiş teknik sonuçlarla aynı düzeyde sunulmamalıdır.

Malzeme içinde veya katı hedeflerde düşük enerjili nükleer reaksiyonların incelendiği çalışmalar da gelişmekte olan araştırma alanları arasında yer almaktadır. Döteryumun metalik örgülere yüksek yoğunlukta yüklenmesi, elektron perdeleme etkileri ve ışın-hedef etkileşimleri, düşük enerjilerdeki nükleer reaksiyon hızlarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. NASA Glenn Araştırma Merkezi tarafından yürütülen *lattice confinement fusion* deneyleri ile döteryum yüklü metal hedefler üzerinde yapılan çalışmalar, ölçülebilir nükleer reaksiyon ürünleri raporlamıştır.[16] Yakın dönem araştırmaları, elektrokimyasal yükleme ve metalik ortamların reaksiyon hızları üzerindeki etkisini daha ayrıntılı biçimde incelemektedir.[17]

Bahsi geçen çalışmalar, oda sıcaklığında kendiliğinden ve yüksek güçte enerji üretilmesini ileri süren geçmişteki soğuk füzyon iddialarından ayrılmaktadır. Deneylerde parçacık hızlandırma, keV ölçeğinde enerji girdisi, yoğun hedef malzemeleri ve nükleer reaksiyon ürünlerinin ölçümü söz konusudur. Buna karşılık gözlenen reaksiyon hızları günümüzde enerji santrali için gerekli düzeyin çok altındadır. Söz konusu alanın yakın dönem değeri, elektrik üretiminden çok nükleer reaksiyon fiziği, hedef malzemeleri, yüzey bilimi, radyasyon ölçümü ve kompakt nötron kaynakları gibi konularda araştırma altyapısı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Enerji üretim yolu olarak değerlendirilmesi ise reaksiyon hızının, toplam enerji bilançosunun ve ölçeklenebilirliğin bağımsız deneylerle gösterilmesini gerektirir.

Alternatif yaklaşımların çokluğu, füzyon alanındaki belirsizliğin yalnızca takvimle sınırlı olmadığına işaret etmektedir. Hangi reaktör mimarisinin daha düşük maliyet, daha yüksek güvenilirlik ve daha kolay bakım sağlayacağı henüz bilinmemektedir. Erken aşamada bulunan teknolojilerin karşılaştırılmasında yalnızca ulaşılan sıcaklık veya ölçülen füzyon ürünü göz önünde bulundurulmamalı; enerji dengesi, tekrarlanabilirlik, bileşen ömrü, yakıt çevrimi ve santral ölçeğine geçiş imkânı bütüncül olarak ele alınmalıdır.

Ticari Füzyonun Ortak Mühendislik Darboğazları

Füzyon yaklaşımları, plazmanın oluşturulması ve hapsedilmesinde farklı yöntemler kullansa da ticari santral aşamasında benzer mühendislik sorunlarıyla karşılaşmaktadır. Teknolojiler arasındaki rekabet çoğu zaman plazma performansı üzerinden anlatılmaktadır ancak bir santralin ekonomik başarısını bileşen ömrü, bakım süresi, yakıt tedariki, tesis iç tüketimi ve elektrik üretim maliyeti gibi değişkenler belirleyecektir. Bu nedenle ortak darboğazların çözülmesi, herhangi bir reaktör mimarisinin tek başına ilerlemesinden daha geniş bir teknoloji tabanı gerektirmektedir.

Döteryum-trityum füzyonundan çıkan yüksek enerjili nötronlar, reaktörün iç yapılarında günümüzdeki fisyon santrallerinden farklı ve daha ağır koşullar oluşturabilir. Plazma ile temas eden yüzeylerin hem yoğun parçacık akısına hem de yüksek sıcaklık değişimlerine dayanması gerekir. Divertör gibi bileşenler, plazmadan çıkan ısı ve parçacıkların kontrollü biçimde uzaklaştırılmasında kritik rol oynar. Bu parçaların sık değiştirilmesi santralin kullanılabilirlik oranını düşürürken çok uzun süre kullanılmaları ise malzeme güvenliği açısından risk doğurabilir. Ticari başarı; dayanıklı bir malzeme geliştirilmesi dışında, bu malzemenin üretilebilir, kaynak yapılabilir, denetlenebilir ve gerektiğinde uzaktan değiştirilebilir olmasına bağlıdır.

Trityum doğada büyük miktarlarda bulunmadığı için döteryum-trityum santrallerinin, kendi yakıtlarını lityum içeren örtü sistemlerinde üretmesi beklenmektedir. Santralin tükettiğinden daha fazla veya en azından yeterli seviyede trityum üretmesi, yakıtın örtü içinden ayrıştırılması, güvenli biçimde depolanması ve yeniden plazmaya verilmesi gerekir. Trityumun reaktör malzemelerine nüfuz etmesi, tesis içinde tutulması ve miktarının hassas biçimde izlenmesi güvenlik ve işletme açısından önemlidir. Bugüne kadar hiçbir füzyon tesisi, elektrik üretimiyle birlikte kapalı ve kendi kendine yeterli bir trityum çevrimini eş zamanlı olarak hayata geçirememiştir. Bu alan, gelecekteki döteryum-trityum santrallerinin aşması gereken en kritik sistem sorunlarından birini teşkil etmektedir.

Manyetik hapsetme tesisleri; güçlü süper iletken mıknatıslara, bu mıknatısları düşük sıcaklıkta tutan kriyojenik altyapıya ve yüksek güçlü ısıtma sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Eylemsiz hapsetmede de lazerler, optik sistemler ve soğutma donanımı önemli miktarda enerji tüketebilir. Santral düzeyinde anlamlı olan, füzyon reaksiyonundan çıkan brüt enerji kadar tesisin kendi tüketimidir. Yardımcı sistemler için gereken elektrik, şebekeye verilebilecek net üretimi azaltmaktadır. Bu nedenle plazma veya hedef kazancı yüksek olsa bile tesis kazancı düşük kalabilir.

Füzyon reaksiyonlarının önemli bir bölümü enerjiyi doğrudan elektrik biçiminde üretmez. Döteryum-trityum sistemlerinde nötronların örtü içinde ısı oluşturması, bu ısının bir soğutucu akışkanla taşınması ve buhar ya da gaz türbini gibi bir güç çevriminde elektriğe dönüştürülmesi beklenmektedir. Bu aşamada; sıcaklık seviyesi, malzeme dayanımı, soğutucu seçimi ve termodinamik verim belirleyici olur. Füzyon çekirdeğinin yüksek enerji üretmesi, ısının güvenilir ve verimli biçimde çekilemediği bir sistemde ekonomik elektrik üretimi için yeterli sonuç vermez.

Reaktörün iç bileşenleri zamanla radyasyon ve ısı yükleri nedeniyle değiştirilecektir. Bazı bölgelerde insan müdahalesi mümkün olmayacağı için bakım işlemlerinin uzaktan kumandalı robotlar aracılığıyla gerçekleştirilmesi gerekir. Bileşen değişiminin aylar sürmesi veya sık tekrarlanması, santralin yıllık elektrik üretimini ve gelirini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle bakım yapılabilirlik, tasarımın son aşamasında eklenecek bir özellik olarak ele alınamaz. Reaktör geometrisi, bileşenlerin modülerliği, robotik erişim ve arıza tespiti; santral tasarımının başlangıcından itibaren birlikte düşünülmelidir.

Füzyon cihazları; büyük boyutlu, yüksek hassasiyetli ve zorlayıcı koşullarda çalışan bileşenlerden oluşmaktadır. Süper iletken kablolar, karmaşık mıknatıs geometrileri, vakum kapları, yüksek güçlü lazer optikleri ve radyasyona dayanıklı elektronik sistemler, ileri üretim ve kalite kontrol gerektirir.

Bir laboratuvar prototipinin çalışması ile aynı bileşenin seri, güvenilir ve kabul edilebilir maliyetle üretilebilmesi arasında önemli bir fark vardır. Ticari santral programlarının ilerlemesi; test yöntemlerinin, malzeme veri tabanlarının, tasarım kodlarının ve uluslararası standartların geliştirilmesine bağlı olacaktır.

Füzyon, fisyon reaktörlerinden farklı bir risk profiline sahiptir. Zincirleme reaksiyon bulunmaması ve reaktör içindeki anlık yakıt miktarının sınırlı olması bazı kaza senaryolarını azaltır. Buna rağmen trityum yönetimi, nötronlarla etkinleşen malzemeler, güçlü manyetik alanlar, kriyojenik sistemler, yüksek gerilim ve lazer güvenliği gibi konular düzenleyici çerçevenin parçası olacaktır. Düzenleme yaklaşımının teknoloji olgunlaşmadan önce geliştirilmesi hem güvenlik standartlarının belirlenmesi hem de gelecekteki yatırım belirsizliğinin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

Füzyonun elektrik piyasasında yer alabilmesi için yalnızca çalışması yeterli olmayacak; alternatif düşük karbonlu üretim seçenekleriyle maliyet, güvenilirlik ve inşa süresi bakımından rekabet edebilmesi gerekecektir. İlk örnek santrallerin yüksek sermaye maliyetine sahip olması beklenebilir. Reaktör bileşenlerinin ömrü, kapasite faktörü, bakım süresi, yakıt çevrimi ve finansman maliyeti; üretilecek elektriğin maliyetini doğrudan etkileyecektir. Günümüzde bu değişkenlerin önemli bölümü deneysel olarak doğrulanmadığı için füzyon elektriğinin gelecekteki maliyetine ilişkin tahminler geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu yüzden şirketlerin ilan ettiği ticari tarihler ve maliyet hedefleri, tasarım varsayımlarına dayanmaktadır.

Ticarileşme belirsizliği, füzyon alanında ilerleme bulunmadığı anlamına gelmez. Aksine bilimsel deneyler, mıknatıs teknolojileri, lazer sistemleri, ileri malzemeler ve hesaplamalı yöntemler geçmiş dönemlere kıyasla daha hızlı gelişmektedir. Belirsizlik, bu ilerlemelerin hangi reaktör mimarisinde, hangi maliyetle ve hangi tarihte bütünleşik bir enerji sistemine dönüşeceği konusunda ortaya çıkmaktadır. Teknik performans ile ekonomik uygulanabilirlik arasındaki mesafe kapandıkça füzyon araştırmalarının ağırlık merkezi de temel plazma fiziğinden malzeme, yakıt çevrimi, bakım, üretim ve santral entegrasyonuna doğru kaymaktadır.

Bu tablo, füzyonun geleceğini tek bir başarı tarihi üzerinden değerlendirmeyi güçleştirmektedir. Bir yaklaşım fiziksel performans bakımından öne çıkarken başka bir yaklaşım daha kolay üretim, sürekli işletme veya düşük bakım ihtiyacı sağlayabilir. Ticari başarı, en yüksek sıcaklığa ya da tek deneyde en yüksek kazanca ulaşan sistemden ziyade bütün santral gereksinimleri arasında sürdürülebilir denge kurabilen teknolojiye ait olacaktır. Bu nedenle füzyonun ticarileşme süreci, önceden belirlenmiş doğrusal bir takvim yerine bilimsel ve mühendislik eşiklerinin aşılmasına bağlı, farklı seçeneklerin yarıştığı bir gelişim alanı olarak ele alınmalıdır.

BÖLÜM 2

ULUSLARARASI FÜZYON REKABETİ VE YENİ SANAYİ EKOSİSTEMİ

Füzyon araştırmaları; uzun yıllar boyunca büyük ölçüde kamu laboratuvarları, üniversiteler ve uluslararası bilimsel iş birlikleri üzerinden ilerlemiştir. Deneysel tesislerin yüksek maliyeti, uzun geliştirme süreleri ve temel bilim sorunlarının ağırlığı, özel sektörün alandaki rolünü sınırlı tutmuştur. Son dönemde ise kamu araştırmaları varlığını korurken özel sektörün de devreye girmesiyle sahadaki aktör yapısı genişleyerek çeşitlenmiştir. Devlet programları, özel şirketler, enerji kuruluşları, teknoloji yatırımcıları ve ileri imalat firmaları; giderek aynı ekosistemin parçaları hâline gelmektedir. Bu değişim, füzyonun laboratuvar ölçeğindeki bir araştırma alanından potansiyel bir sanayi ve teknoloji politikası alanına doğru genişlediğini göstermektedir.

Fusion Industry Association (FIA) verilerine göre özel füzyon şirketlerinin bildirdiği toplam finansman 2026 itibarıyla 14,24 milyar dolara ulaşmış, Temmuz 2026'ya kadar geçen 12 aylık dönemde 4,48 milyar dolarlık yeni kaynak sağlanmıştır. Sektörde doğrudan ve dolaylı olarak 16 binden fazla kişinin istihdam edildiği bildirilmektedir.[18] Bu rakamlar, ticari füzyonun yakın zamanda kesin olarak gerçekleşeceğini kanıtlamamaktadır. Bununla birlikte yatırımcıların, devletlerin ve büyük enerji kullanıcılarının füzyonu yalnızca uzak geleceğe ait bir bilimsel ihtimal olarak görmediğine de işaret etmektedir.

Uluslararası rekabetin niteliğini yalnızca hangi ülkenin ilk füzyon santralini kuracağı yarışına indirgemek, eksik bir değerlendirme olacaktır. Rekabet; aynı zamanda süper iletken mıknatıslar, ileri malzemeler, lazerler, vakum ve kriyojenik sistemler, güç elektroniği, robotik, sensörler, yapay zekâ ve hassas üretim gibi alanlarda gelişmektedir. Bir ülke, ilk santrali kendi topraklarında kurmasa bile gelecekteki santrallerin kritik bileşenlerini üreterek önemli bir ekonomik ve stratejik konum kazanabilir. Benzer biçimde ilk santrali kuran bir ülkenin temel teknolojilerde dışa bağımlı kalması, elde edeceği stratejik avantajı sınırlandırabilir. Bu nedenle füzyon yarışı bir reaktör yarışından ziyade daha geniş bir sanayi kapasitesi ve teknoloji hâkimiyeti mücadelesine dönüşmektedir.

Füzyonun Çok Boyutlu Stratejik Önemi

Devletlerin füzyona ilgisinin artmasında; enerji güvenliği, iklim hedefleri ve gelecekteki elektrik talebine ilişkin beklentiler birlikte etkili olmaktadır. Yapay zekâ, veri merkezleri, elektrikli ulaşım, hidrojen üretimi ve sanayinin elektrifikasyonu; güvenilir ve düşük karbonlu elektrik talebini büyütmektedir. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynakların hızla yaygınlaşmasına rağmen şebeke esnekliği, depolama, arazi kullanımı ve uzun süreli üretim sürekliliği gibi konular, enerji sistemlerinde farklı düşük karbonlu seçeneklere yönelik arayışı sürdürmektedir. Füzyon, ticari başarıya ulaşması hâlinde yüksek enerji yoğunluğu ve kesintisiz üretim potansiyeliyle bu arayışın uzun vadeli seçeneklerinden biri olabilir.

Füzyonun uzun vadeli jeopolitik önemi, enerji üretiminde yaratabileceği dönüşümle doğrudan ilişkilidir. Ticari ve ekonomik açıdan uygulanabilir hâle gelmesi ve geniş ölçekte yaygınlaşması durumunda füzyon, enerji kaynaklarının coğrafi dağılımına dayanan mevcut bağımlılık ilişkilerini ve

enerji arzının uluslararası güç dengelerindeki rolünü belirli ölçüde değiştirebilir. Ancak bu dönüşüm, enerji jeopolitiğinin önemini ortadan kaldırmak yerine stratejik bağımlılıkların niteliğini değiştirebilir. Geleneksel enerji kaynaklarına bağımlılığın azalmasına karşılık kritik reaktör bileşenleri, ileri malzemeler, yakıt çevrimi teknolojileri ve mühendislik altyapıları etrafında yeni bağımlılık ilişkileri ortaya çıkabilir. Dolayısıyla enerji güvenliği, giderek teknoloji güvenliği ve ileri sanayi kapasitesiyle daha güçlü biçimde iç içe geçebilir.

Devletlerin yaklaşımı yalnızca gelecekte üretilecek elektriğe dayanmamaktadır. Füzyon programları, çok sayıda ileri teknolojinin birlikte geliştirilmesini gerektirdiği için geniş bir sanayi politikası aracı olarak da görülmektedir. Yüksek alanlı mıknatıslar sağlık, ulaşım ve bilimsel cihazlarda; radyasyona dayanıklı malzemeler nükleer enerji ve uzay sistemlerinde; yüksek güçlü lazerler savunma, tıp ve ileri imalatta; robotik bakım teknolojileri ise tehlikeli endüstriyel ortamlarda kullanılabilir. Füzyon santralinin ticari takvimi gecikse bile bu alanlarda kazanılan bilgi, yetişen insan kaynağı ve oluşan şirketler ekonomik değer üretmeye devam edebilir.

Füzyon ile yapay zekâ arasındaki ilişki, teknopolitik dönüşümün çift yönlü niteliğini göstermesi bakımından da dikkat çekicidir. Yapay zekâ ve yüksek başarımlı hesaplama, plazma kontrolünden malzeme keşfine kadar füzyon araştırmalarını hızlandırırken yapay zekânın yaygınlaşması ve veri merkezlerinin büyümesi de güvenilir elektrik üretimine yönelik talebi artırmaktadır. Füzyonun gelecekte ekonomik ve kesintisiz elektrik üretiminde başarılı olması, ileri bilgi işlem altyapılarının enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına katkı sağlayabilir. Böylece enerji üretim kapasitesi ile hesaplama gücü arasında giderek derinleşen karşılıklı ilişki, teknolojik rekabetin ve stratejik üstünlük arayışının önemli unsurlarından biri hâline gelebilir.

Füzyonun teknolojik geleceği henüz kesinleşmediği için kamu politikası açısından temel sorun, hangi tasarımın sonunda başarılı olacağını önceden tahmin etmekten çok belirsizliği yönetmektir. Devletlerin bir bölümü pilot proje programlarına ağırlık verirken bir bölümü ise birden fazla özel şirketi aynı anda desteklemektedir. Bazı ülkeler büyük araştırma altyapılarını öncelemekte, bazıları ise tedarik zinciri ve ihracat kapasitesi üzerinden konumlanmaktadır. Farklı modellerin ortak noktası, füzyonun tek bir proje veya cihaz üzerinden yönetilemeyecek kadar geniş ve uzun vadeli bir teknoloji alanı olduğunun kabul edilmesidir.

Ulusal Politika Modelleri ve Stratejiler

Uluslararası füzyon politikalarında tek bir başarılı model bulunmamaktadır. Ülkeler; mevcut bilimsel altyapıları, sanayi yapıları, enerji ihtiyaçları ve kamu-özel sektör ilişkileri doğrultusunda farklı yöntemler geliştirmektedir. ABD rekabetçi kamu-özel mekanizmalarıyla teknolojik çeşitliliği desteklerken Birleşik Krallık görev odaklı ulusal programını STEP, beceri geliştirme ve tedarik zinciri etrafında bütünleştirmektedir. Çin uzun vadeli devlet planlaması ve büyük araştırma tesisleriyle ilerlemekte; Almanya, Japonya ve Güney Kore ise kendi sanayi yetkinliklerini farklı biçimlerde füzyon tedarik zincirine bağlamaktadır. AB ise çok taraflı bilimsel altyapı, ortak tedarik ve maliyet paylaşımı modeli üzerinden konumlanmaktadır.

ABD: Rekabetçi Kamu-Özel Sektör Ortaklığı

ABD füzyon modeli, ulusal laboratuvarların bilimsel kapasitesiyle özel şirketlerin teknoloji geliştirme hızını bir araya getirmeye çalışmaktadır. Füzyonun ulusal teknoloji politikası içindeki görünürlüğü, Mart 2022'de Beyaz Saray Bilim ve Teknoloji Politikası Ofisi ile Enerji Bakanlığı tarafından düzenlenen Ticari Füzyon Enerjisi İçin Cesur On Yıllık Vizyon zirvesiyle belirgin biçimde artmıştır. Haziran 2024'te açıklanan ABD Füzyon Enerjisi Stratejisi ise bilimsel ve teknolojik boşlukların kapatılması, ticarileşmenin önündeki ekonomik ve düzenleyici engellerin ele alınması ve kamu, özel sektör ile uluslararası ortaklıkların genişletilmesi şeklinde üç ana yön belirlemiştir.[19]

Haziran 2026'da yayımlanan *Fusion Science and Technology Roadmap*, söz konusu yaklaşımı daha ayrıntılı bir ulusal çerçeveye dönüştürmüştür.[20] ABD; yol haritasında yer alan *Build-Innovate-Grow* yaklaşımıyla ortak araştırma ve test altyapılarının kurulmasını, bilimsel ve teknolojik yeniliklerin hızlandırılmasını ve başarılı çözümlerin sanayi ölçeğine taşınmasını hedeflemektedir. Yol haritası; yapısal malzemeler, plazma ile temas eden bileşenler, hapsetme sistemleri, yakıt çevrimi, örtü teknolojileri ve santral entegrasyonu gibi ortak sorunları tek tek şirketlerin çözmesi gereken özel problemler olarak değerlendirmemektedir. Bu alanlarda kamu altyapısının ve ulusal laboratuvarların tüm ekosisteme destekleyici bir rol üstlenmesi öngörülmektedir.

ABD modelinin ayırt edici araçlarından biri *Milestone-Based Fusion Energy Development Program*'dır. Programda şirketlere bütün proje maliyetini karşılayacak şekilde başlangıç finansmanı sağlanması yerine önceden belirlenen teknik hedeflere ulaşıldığında ödeme yapılmaktadır. Şirket kendi sermayesiyle çalışmakta, teknik sonuç bağımsız değerlendirmeden geçmekte ve kamu ödemesi doğrulanan ilerlemenin ardından gerçekleşmektedir. Bu yöntem, devletin başlangıçta kazanan teknolojiyi seçme ihtiyacını azaltırken şirketlerin kamu kaynağına erişimini ölçülebilir performansa bağlamaktadır.

Fusion Innovation Research Engine (FIRE) ve INFUSE programları ise üniversiteler, ulusal laboratuvarlar ve özel şirketler arasındaki altyapı ile bilgi paylaşımını desteklemektedir. Her şirketin kendi nötron test tesisini, malzeme laboratuvarını, süper bilgisayar altyapısını veya trityum araştırma sistemini kurması ekonomik açıdan gerçekçi değildir. Ortak kamu altyapıları bu yüksek maliyetli ihtiyaçları paylaşılabilir hâle getirmekte, şirketlerin kendi tasarım ve üretim kabiliyetlerine odaklanmasını sağlamaktadır. Eylül 2025'te FIRE iş birlikleri ve INFUSE projeleri için açıklanan toplam 134 milyon dolarlık destek; malzemeler, lazer teknolojileri, yüksek sıcaklık süper iletken mıknatıslar ve yapay zekâ destekli modelleme gibi farklı alanlara yönelmiştir.[21] ABD Enerji Bakanlığı bünyesinde 2026 yılında oluşturulan Füzyon Ofisi de araştırma programlarıyla ticarileşme hedefleri arasındaki koordinasyonu güçlendirmeyi amaçlamaktadır.[22]

Birleşik Krallık: Ulusal Program Temelli Kamu-Özel Sektör Ortaklığı

Birleşik Krallık ise ABD'nin şirketler arası rekabete dayalı yapısına kıyasla daha belirgin bir ulusal program bütünlüğü taşımaktadır. Mart 2026'da açıklanan füzyon stratejisi[23] kapsamında 2025/26-2029/30 dönemi için füzyona 2,5 milyar sterlinden fazla kamu kaynağı ayrılmıştır. Bu kaynağın 1,3 milyar sterlini STEP prototip programına, 740 milyon sterlini manyetik ve eylemsiz füzyon

araştırma altyapılarına, 180 milyon sterlini lityum ve trityum teknolojilerine, 110 milyon sterlini sanayi ve ticarileşme desteğine, 80 milyon sterlini uluslararası iş birliklerine ve 50 milyon sterlini beceri geliştirme programlarına yöneltilmiştir. Culham bölgesindeki yapay zekâ büyüme alanı için ayrılan 125 milyon sterlin de füzyon ile dijital teknolojiler arasındaki bağlantıyı güçlendirmektedir.

Mevzubahis bütçe dağılımı, Birleşik Krallık'ın füzyonu yalnızca STEP reaktöründen oluşan bir büyük proje olarak görmediğine işaret etmektedir. Araştırma altyapısı, trityum, şirketler, uluslararası iş birliği ve insan kaynağı; aynı programın tamamlayıcı parçaları olarak ele alınmaktadır. Ülkenin hedefi, bir prototip reaktör geliştirmenin yanında gelecekteki uluslararası füzyon pazarına ekipman, mühendislik ve hizmet sağlayabilecek bir sanayi tabanı oluşturmaktır. Düzenleyici çerçevenin teknoloji olgunlaşmadan önce hazırlanması da yatırımcılar ve tesis geliştiricileri açısından belirsizliği azaltmayı amaçlamaktadır.

ABD ve Birleşik Krallık örnekleri, birbirinden farklı iki kamu-özel sektör ilişkisi ortaya koymaktadır. ABD'de devlet ortak bilimsel altyapıyı ve doğrulama mekanizmalarını kurarken birden fazla şirket, kendi teknoloji seçimini ve sermaye riskini üstlenmektedir. Birleşik Krallık ise ulusal bir pilot proje programını merkezde tutarak araştırma, beceri ve tedarik zincirini bu hedef çevresinde birleştirmektedir. Birinci model teknolojik çeşitliliği, ikinci model kurumsal odaklanmayı güçlendirmektedir.

Çin: Uzun Vadeli Devlet Planlaması ve Altyapı Odaklı Model

Çin'in füzyon politikası, uzun dönemli kamu planlamasıyla büyük araştırma altyapılarının birlikte geliştirilmesine dayanmaktadır. Füzyon; enerji güvenliği, ileri sanayi kapasitesi ve teknolojik bağımsızlık hedefleriyle ilişkilendirilmekte, tek bir deney cihazından daha geniş bir program olarak ele alınmaktadır. Ulusal araştırma kurumları, kamu şirketleri, üniversiteler, yerel yönetimler ve son dönemde sayıları artan özel girişimler; aynı ekosistemin farklı katmanlarını oluşturmaktadır.

EAST tokamağında elde edilen uzun süreli plazma sonuçları, Çin'in temel plazma araştırmalarındaki birikimini göstermektedir. Bunun yanında CRAFT, Çin modelinin mühendislik yönünü daha açık biçimde ortaya koymaktadır.[24] CRAFT; doğrudan elektrik üretmeyi amaçlayan bir reaktör yerine mıknatıslar, vakum sistemleri, ısıtma ve akım sürme teknolojileri, yakıt çevrimi, uzaktan bakım ve büyük reaktör bileşenlerini geliştirmek ve test etmek üzere tasarlanmıştır. Böylece büyük bir reaktör kurulmadan önce reaktörün ihtiyaç duyacağı alt sistemlerin ayrı ayrı öğrenilmesi ve olgunlaştırılması hedeflenmektedir.

Çin'in yaklaşımı araştırma tesislerini sanayi ve bölgesel kalkınma politikasıyla da birleştirmektedir. Hefei çevresinde geliştirilen Füzyon Şehri yaklaşımı; araştırma merkezlerini, mühendislik tesislerini, şirketleri, üretim altyapısını ve nitelikli iş gücünü aynı bölgede yoğunlaştırmayı amaçlamaktadır.[25] Bu model, ileri teknolojinin yalnızca bir laboratuvar binası veya deney cihazıyla oluşmadığı; araştırmacılar, mühendisler, teknisyenler ve tedarikçilerin uzun süre birlikte çalışabileceği bir ekosisteme ihtiyaç duyduğu kabulüne dayanmaktadır.

Özel sektörün büyümesi, Çin modelinin yalnızca kamu programlarından oluşmadığına işaret etmektedir. Energy Singularity gibi şirketler yüksek sıcaklık süper iletken mıknatıslara dayalı kompakt tokamaklar

geliştirirken başka girişimler, farklı manyetik hapsetme tasarımları üzerinde çalışmaktadır.[26] Sermaye piyasalarının füzyon dâhil geleceğin teknolojilerindeki şirketlere açılması, kamu altyapısının yanına özel sermaye ve girişimcilik kanalı eklemektedir. Diğer taraftan Çin'in füzyon harcamaları ve program bütçelerine ilişkin veriler diğer ülkelere kıyasla daha sınırlıdır. Çin'in 2023-2025 dönemindeki ileri füzyon tesisleri ve teknolojilerine yaklaşık 6,5 milyar dolar yatırım yaptığı tahmin edilmektedir.[27] Bu rakam, Çin hükûmetinin ayrıntılı resmî bütçe beyanı olarak değerlendirilmemelidir.

Çin modelinin temel özelliği, füzyon santralinin ortaya çıkmasını beklemeden gerekli bilimsel ve endüstriyel kapasiteyi büyük ölçekli yatırımlarla oluşturmaya çalışmasıdır. Kamu programları bilimsel sürekliliği sağlarken mühendislik test tesisleri alt sistemleri olgunlaştırmakta, yerel kümelenmeler üretim kapasitesini geliştirmekte ve özel şirketler farklı tasarımları daha hızlı biçimde denemektedir. Bu yapı, önemli bir kaynak ve koordinasyon avantajı sağlamaktadır. Buna karşılık büyük kamu programlarında verimlilik, bağımsız değerlendirme ve teknolojik seçeneklerin açık tutulması ayrıca önem taşımaktadır.

Sanayi Tedarikçiliği ve İhracat Odaklı Yaklaşım: Almanya, Japonya ve Güney Kore

Almanya'nın füzyon politikası, güçlü araştırma merkezleriyle sanayi ve standardizasyon kapasitesini bir araya getirmektedir. Federal politika çerçevesinde 2029'a kadar füzyon araştırmalarına yaklaşık 2,44 milyar euro ayrılmasıyla araştırma altyapıları, füzyon merkezleri, pilot projeler, insan kaynağı ve stratejik iş birliklerinin desteklenmesi öngörülmektedir.[28] Almanya'nın Max Planck Plazma Fiziği Enstitüsü ve Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü gibi kurumlarda oluşan bilimsel birikimi, mühendislik ve ileri imalat kapasitesiyle tamamlanmaktadır.

Alman yaklaşımında standardizasyon özellikle önemlidir. Füzyon sanayisinin büyümesi; yalnızca yeni cihazların geliştirilmesine değil malzeme özelliklerinin, test yöntemlerinin, güvenlik gerekliliklerinin ve bileşen performansının ortak standartlarla tanımlanmasına bağlıdır. Bu standartların erken dönemde geliştirilmesine katılan ülkeler, gelecekteki tedarik zincirlerinin teknik şartlarının belirlenmesinde etkili olabilir. Dolayısıyla bilimsel birikim, sanayi politikası ve pazar oluşturma kapasitesiyle birleşmektedir.

Japonya da füzyonu; enerji üretiminin yanında hassas imalat, süper iletken teknolojiler, ileri malzemeler, optik, güç elektroniği ve ağır mühendislik alanlarındaki mevcut üstünlüklerini geleceğin enerji ekonomisine taşıyabilecek bir platform olarak görmektedir. İlk ulusal Fusion Energy Innovation Strategy Nisan 2023'te kabul edilmiş, 4 Haziran 2025 tarihinde güncellenmiştir. 2026'da kamu-özel yatırım yol haritası ve füzyondan elektrik üretimini göstermeye yönelik projeler hükûmet gündeminde daha görünür hâle gelmiştir.[29]

Japonya'nın yaklaşımında tek bir reaktör teknolojisinin erken aşamada kazanan olarak ilan edilmemesi dikkat çekmektedir. Tokamak, helical sistemler ve lazer füzyonu farklı kamu ve özel sektör programlarında gelişmeye devam etmektedir. Kyoto Fusioneering örtü, trityum ve ısı çıkarma gibi santral mühendisliği alanlarına;[30] Helical Fusion stellaratör temelli sistemlere;[31] EX-Fusion ise lazer tabanlı yaklaşımlara odaklanmaktadır.[32] Bu çeşitlilik, Japonya'nın bütün sanayi kapasitesini tek bir fiziksel mimariye bağlamak yerine ortak bileşenler ve farklı teknoloji seçenekleri üzerinden risk

dağıttığını göstermektedir. Yaklaşık 60 milyar yen (~380 milyon dolar) bütçeye sahip sanayi liderliğindeki pilot proje programı da kamu desteğiyle özel girişimin daha erken aşamada bir araya getirilmesini amaçlamaktadır.[33]

Güney Kore'nin füzyon politikası, kamu araştırma altyapısından elde edilen bilginin sanayiye ve ihracata aktarılmasına odaklanmaktadır. KSTAR ve ITER kapsamında kazanılan deneyimin divertör, örtü, süper iletken sistemler ve diğer kritik bileşenlerde yerli şirketlerle birlikte ürüne dönüştürülmesi hedeflenmektedir. 2024'te açıklanan *Strategy to Accelerate Nuclear Fusion Energy Realization*, teknolojik inovasyonun yanında sanayileşme ve füzyon ekosistemini ulusal politikanın merkezine yerleştirmiştir. Yeni füzyon teknolojileri ve altyapıları için toplam 1,2 trilyon won (~880 milyon dolar) büyüklüğündeki programların fizibilitesi değerlendirilmektedir.[34]

Güney Kore'nin güncel hedefleri arasında 2030'lu yıllarda elektrik üretiminin gösterilmesi ve 2035'e kadar yenilikçi bir pilot projenin geliştirilmesi bulunmaktadır. Bu takvim, gerçekleşmiş teknik sonuçtan çok iddialı bir politika hedefidir. Pilot proje için 2027'den itibaren özel amaçlı bir kamu-özel şirket yapısının değerlendirilmesi, devletin yön belirlediği ve özel sektörün zaman içinde daha büyük sorumluluk üstlendiği bir modele işaret etmektedir.

Güney Kore modeli, ihracat hazırlığını araştırma programına erken aşamada dâhil etmesi bakımından öne çıkmaktadır. Koreli şirketlerin yabancı füzyon projelerindeki ihalelere erişebilmesi için teknik, düzenleyici ve ticari bilgileri bir araya getirecek kapsamlı bir ihracat bilgi platformu planlanmaktadır. KSTAR ve diğer kamu altyapılarının şirketlerin kullanımına daha fazla açılması, kamu araştırmalarında ortaya çıkan fikrî mülkiyetin girişimlere aktarılması ve füzyon verileri için büyük veri merkezi kurulması da aynı yaklaşımın parçalarıdır. Dijital ikiz, yapay zekâ ve uzaktan izleme teknolojileri, Kore'nin mevcut dijital kapasitesini füzyon sistemlerine taşıdığı öncelikli alanlar arasında yer almaktadır.

İnfografik 4: Ülkelerin Ulusal Füzyon Politikası Modelleri



Almanya, Japonya ve Güney Kore örnekleri, füzyon yarışına katılmanın ulusal reaktör inşa etmekle başlaması gerekmediğini göstermektedir. Almanya araştırma ve standardizasyonu; Japonya hassas üretim, teknoloji çeşitliliği ve tedarik zincirini; Güney Kore ise dijital teknolojiler ile ihracat kapasitesini öne çıkarmaktadır. Her ülke sahip olduğu sanayi ve teknoloji tabanını füzyonun ortak ihtiyaçlarına bağlamaya çalışmaktadır.

Avrupa Birliği: ITER, Çok Taraflı Araştırma ve Tedarik Modeli

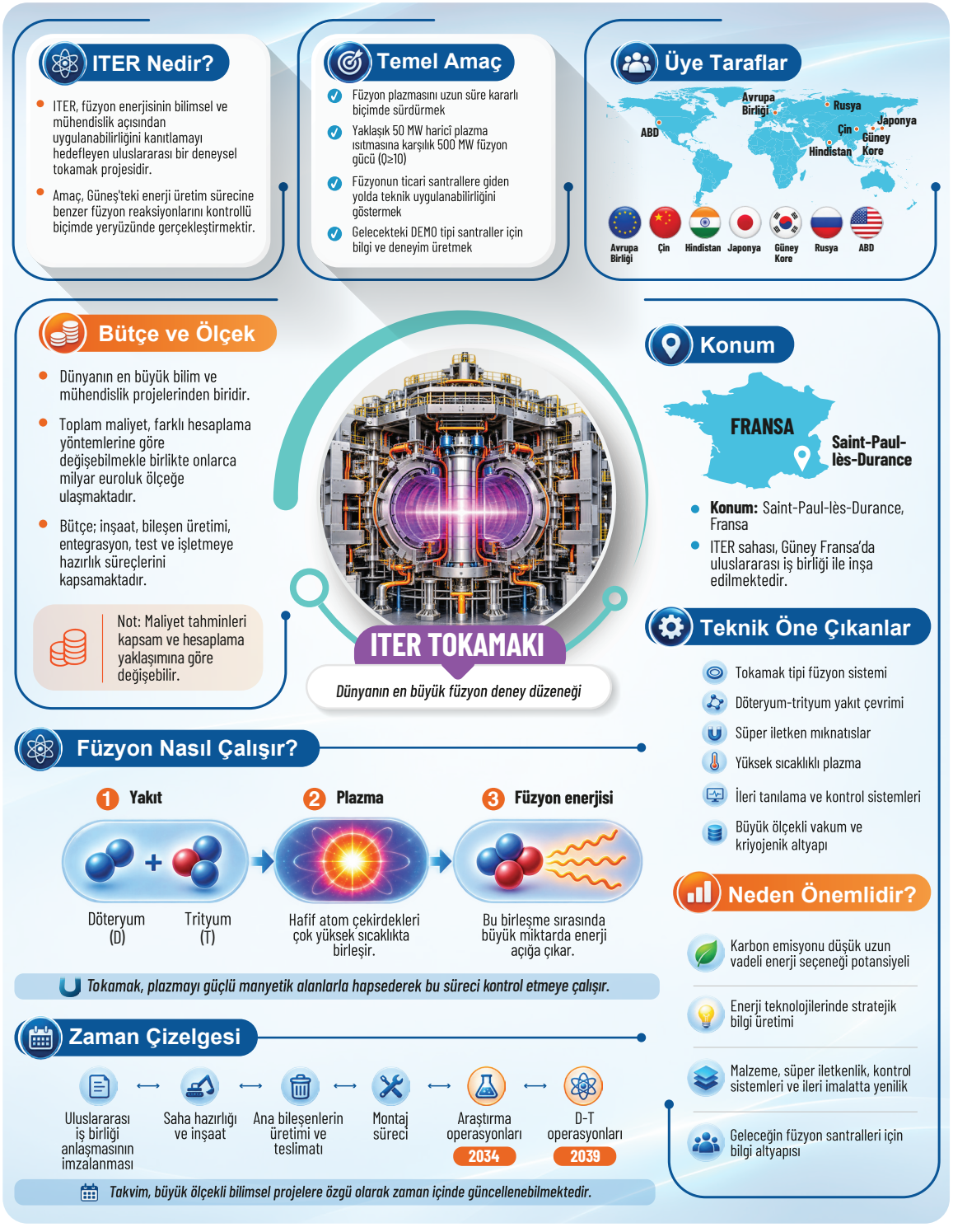
AB'nin füzyon alanındaki rolü ITER'e ev sahipliği yapmakla sınırlı kalmamaktadır. Euratom çerçevesinde finanse edilen EUROfusion programı;[35] plazma fiziği, malzeme araştırmaları, füzyon teknolojileri, DEMO tasarımı ve insan kaynağının geliştirilmesini koordine ederken[36] Fusion for Energy, Avrupa'nın ITER katkılarının mühendisliği ile üretiminde ve gelecekteki füzyon teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.[37] Bu çok ülkeli yapı; Avrupa'daki bilimsel ve mühendislik kapasitesini ortak bir program altında birleştirerek araştırmacıların büyük ölçekli deneysel altyapılara, uzmanlığa ve ortak teknoloji geliştirme faaliyetlerine erişimini mümkün kılmaktadır.

ITER'in inşası sırasında farklı ülkelerdeki şirketler yüksek hassasiyetli ve olağanüstü teknik gerekliliklere sahip bileşenler üretmiştir. Fusion for Energy kapsamında sipariş alan şirketlerin bir bölümü; yeni üretim yöntemleri, kalite güvence süreçleri ve uluslararası proje yönetimi yetkinlikleri kazanmıştır. Avrupa Komisyonunun program değerlendirmeleri, ITER tedariklerinin şirketler açısından yalnızca satış geliri yaratmadığını; aynı zamanda teknik bilgi, insan kaynağı ve ileri imalat kapasitesi de oluşturduğunu göstermektedir.[38] Bu durum, büyük bilim projelerinin doğrudan ticari ürün ortaya çıkmadan önce sanayi öğrenmesi sağlayabileceğine işaret etmektedir.

Çok taraflı yapı aynı zamanda koordinasyon ve takvim riski taşımaktadır. Farklı ülkelerde üretilen bileşenlerin aynı kalite ve toleranslarda bir araya getirilmesi, karar süreçlerinin çok sayıda taraf arasında yürütülmesi ve maliyet artışlarının ortak biçimde yönetilmesi büyük zorluklar doğurmuştur. ITER'de yaşanan gecikmeler, uluslararası iş birliğinin bilimsel ve finansal imkânlarını gösterdiği kadar karmaşık yönetişim sorunlarını da görünür kılmıştır. Buna rağmen ITER; reaktör ölçeğinde üretim, montaj, kalite kontrol ve tedarik zinciri deneyimi bakımından uluslararası füzyon ekosisteminin merkezî projelerinden biri olmayı sürdürmektedir.

Füzyon alanındaki uluslararası ortaklıklar, bilimsel iş birliği ile stratejik rekabetin eş zamanlı ilerlediği bir yapı sergilemektedir. Büyük araştırma altyapıları maliyet ve teknik risklerin paylaşılmasını sağlarken bu altyapılara erişim, araştırma verilerinden yararlanma ve ortak teknoloji geliştirme imkânları; ülkelerin bilimsel ve endüstriyel konumlarını da etkilemektedir. Bu nedenle füzyon diplomasisi; alışılagelmiş bilimsel iş birliğinin ötesinde teknoloji transferi, fikrî mülkiyet, araştırma güvenliği ve kritik tedarik zincirlerine katılım gibi konularla giderek daha fazla ilişkilendirilebilir. Füzyon alanındaki uluslararası ortaklıkların stratejik değeri, ülkelerin bu ortaklıklar yoluyla ne ölçüde kalıcı teknolojik kapasite geliştirebildikleriyle de ölçülmelidir.

İnfografik 5: ITER'in Temel Amacı, Uluslararası Yapısı, Teknik Özellikleri ve Füzyon Enerjisinin Geliştirilmesindeki Stratejik Rolü



Kaynak: ITER verilerinden uyarlanmıştır.

Özel Sektör ve Ticarileşme Sinyalleri

Özel sektörün füzyona yönelmesi, son dönemdeki en görünür değişimlerden biridir. Büyük yatırım turları; şirketlerin daha kapsamlı deney düzenekleri kurmasına, yüzlerce bilim insanı ile mühendisi istihdam etmesine ve üretim altyapısına yatırım yapmasına imkân vermektedir. Kamu laboratuvarlarında yıllara yayılan bazı geliştirme süreçleri, özel şirketlerde daha kısa tasarım ve prototipleme döngüleriyle yürütülmeye çalışılmaktadır. Bu hız avantajı, şirketlerin teknik ve finansal riski daha yoğun biçimde üstlenmesiyle birlikte ortaya çıkmaktadır.

Sermaye artışının arkasında birkaç etken bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık süper iletkenleri ve ileri hesaplama gibi teknolojiler, daha önce gerçekçi görülmeyen kompakt tasarımları mümkün hâle getirmiştir. NIF deneylerinde ateşleme eşiğinin aşılması, füzyonun kamuoyu ve yatırımcılar nezdindeki görünürlüğünü artırmıştır. Bununla birlikte yapay zekâ ve veri merkezlerinin hızla artan elektrik talebi, büyük teknoloji şirketlerini uzun vadeli enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Devletlerin füzyon stratejileri, araştırma altyapıları ve kamu-özel sektör programları da özel yatırım açısından teknik ve politik riskin bir bölümünü azaltmaktadır.

Bahsi geçen gelişmeler, yatırım büyüklüğünün teknik başarıyla aynı gösterge olarak kullanılmasını haklı çıkarmamaktadır. Ayrıca bir şirketin yüksek değerlemeye ulaşması, plazma veya tesis kazancı elde ettiğini de göstermez. Benzer biçimde büyük bir yatırım turu, ticari santral için gerekli toplam sermayenin sağlandığı anlamına gelmeyebilir. Füzyon şirketleri; uzun geliştirme süresi, yüksek sermaye ihtiyacı ve belirsiz gelir takvimiyle karşı karşıyadır. Finansman verileri, teknolojinin fiziksel olgunluğundan ziyade yatırımcıların beklentisini ve şirketlerin prototip geliştirme kapasitesini yansıtmaktadır.

2026'da öne çıkan örnekler bu ayrımın önemini ortaya koymaktadır (bk. Tablo 1). Commonwealth Fusion Systems, Temmuz 2026'da 1 milyar dolarlık yeni sermaye turu açıklayarak toplam finansmanını yaklaşık 4 milyar dolara çıkarmıştır.[39] Şirketin yüksek alanlı tokamak yaklaşımına dayanan SPARC cihazı, şirket açıklamasına göre Eylül 2026 itibarıyla yaklaşık %80 oranında tamamlanmıştır.[40] Helion Energy'nin 2026 Seri G turu 500 milyon dolar düzeyinde kapanmış, şirkete yapılan toplam yatırım yaklaşık 1,5 milyar dolara ulaşmıştır.[41] TAE Technologies, kuruluşundan bu yana 1,3 milyar doların üzerinde sermaye toplamış,[42] Proxima Fusion toplam finansmanını 200 milyon euroya çıkarmış,[43] Thea Energy ise Mayıs 2026'daki Seri B turunda 100 milyon dolar yeni kaynak sağlamıştır.[44] Pacific Fusion, New Mexico'da yaklaşık 1 milyar dolar ölçeğinde bir araştırma ve üretim kampüsünün inşasına başlamıştır.[45]

Elektrik alım anlaşmaları, füzyon ekonomisinde yeni bir talep sinyali oluşturmaktadır. Google'ın Commonwealth Fusion Systems,[46] Microsoft'un ise Helion ile yaptığı anlaşmalar,[47] büyük elektrik kullanıcılarının gelecekteki füzyon üretimine erken erişim sağlamak istediğini göstermektedir. Bu anlaşmalar; şirketlere yatırımcı güveni, potansiyel gelir görünürlüğü ve müşteriyle birlikte teknik gereklilik geliştirme imkânı sağlayabilir. Ancak sözleşmelerin ticari değeri, santrallerin zamanında kurulması ve hedeflenen performansı göstermesi koşuluna bağlıdır. Bu nedenle alım anlaşmaları gerçekleşmiş enerji satışı olarak sunulmamalıdır.

Tablo 1: Bazı Özel Füzyon Şirketleri ve Kamuya Açıklanmış Ekonomik Göstergeler

Şirket	Teknolojik Yaklaşım	Açıklanan Finansman veya Ekonomik İşaret	Mevcut Aşama	Açıklanan Hedefin Niteliği
Commonwealth Fusion Systems (ABD)	Yüksek alanlı kompakt tokamak	Toplam yaklaşık 4 milyar dolar, Google ile 200 MW ve Eni ile 1 milyar doların üzerinde koşullu alım anlaşmaları	SPARC inşa ve devreye alma aşamasında	ARC santrali ve 2030'ların başında elektrik hedefi şirket planıdır.
Helion Energy (ABD)	Darbeli alan-tersi konfigürasyon	Toplam yaklaşık 1,5 milyar dolar, Microsoft ile en az 50 MW'lık anlaşma	Orion tesisi geliştirme aşamasında	2028 başlangıç tarihi yüksek belirsizlik taşıyan şirket hedefidir.
TAE Technologies (ABD)	Işın destekli alan-tersi konfigürasyon	Toplam öz sermaye 1,3 milyar doların üzerinde	Ardışık deney cihazları	İleri yakıt ve ticari sistem hedefleri teknik doğrulamaya bağlıdır.
Proxima Fusion (Almanya)	Stellaratör	Toplam yaklaşık 200 milyon euro	Tasarım ve donanım geliştirme	2030'lar için pilot proje ve santral hedefleri bulunmaktadır.
Thea Energy (ABD)	Düzlemsel bobinli stellaratör	2026 Seri B turu 100 milyon dolar	Tasarım, mıknatıs ve prototip geliştirme	Ticari tesis tasarımı erken mühendislik aşamasındadır.
Pacific Fusion (ABD)	Darbeli manyeto-eylemsiz sistem	Yaklaşık 1 milyar dolarlık araştırma ve üretim kampüsü	Tesis inşa aşamasında	2030 net tesis kazancı hedefi bir elektrik santrali hedefi değildir.

Füzyon yatırımlarını değerlendirirken dört temel hatadan kaçınılması gerekir. Birincisi, şirket değerlemesini şirkete aktarılmış sermaye gibi değerlendirmektir. İkincisi, farklı dönem ve kapsamları içeren kamu bütçelerini doğrudan sıralamaktır. Üçüncüsü, koşullu alım anlaşmalarını bugünkü gelir olarak kabul etmektir. Dördüncüsü ise şirketlerin açıkladığı pilot proje veya santral tarihlerini bağımsız biçimde doğrulanmış takvimler gibi sunmaktır. Finansal hareketlilik, teknolojinin önem kazandığını gösterir. Fiziksel uygulanabilirlik ise deneysel ve mühendislik verileriyle değerlendirilmelidir.

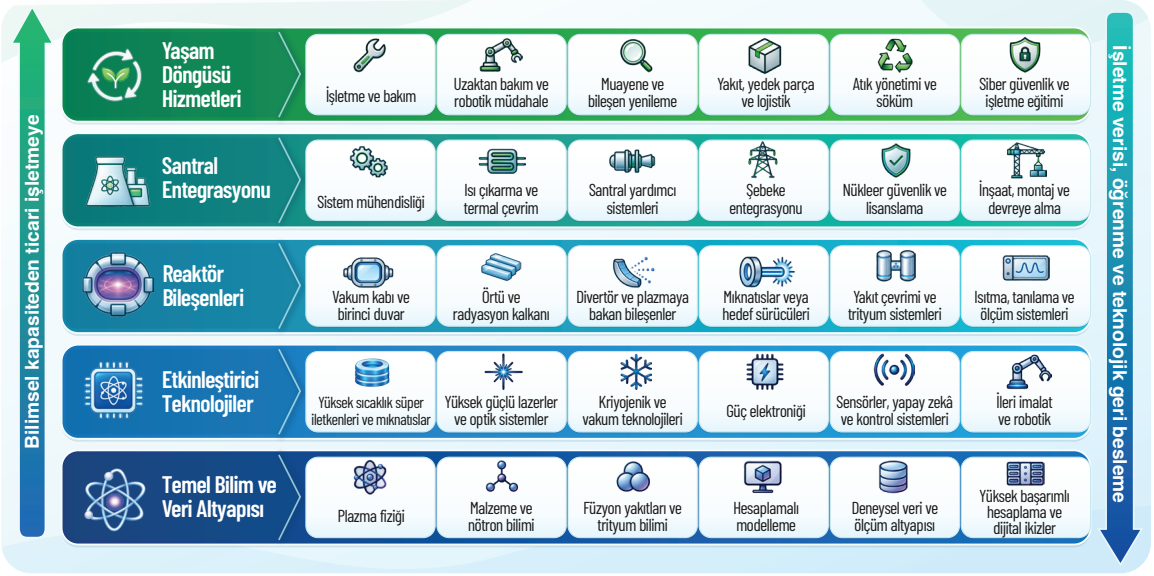
Füzyon Tedarik Zincirinin Stratejik Katmanları

Füzyon ekonomisinde ilk önemli gelirlerin, santrallerde üretilen elektrikten önce tedarik zincirinde ortaya çıkması beklenebilir. Büyük araştırma tesisleri ve özel şirket prototipleri; hâlihazırda mıknatıs, vakum ekipmanı, lazer, güç elektroniği, özel alaşım, sensör, robotik ve yazılım talebi oluşturmaktadır.

Talep, füzyonun nihai ticari başarısından bütünüyle bağımsız olmamakla birlikte ilk ticari santralin devreye girmesini beklemeden şimdiden ekonomik faaliyet yaratmaktadır.

Tedarik zincirinin ilk katmanında; temel bilim, yüksek başarımlı hesaplama, simülasyon ve araştırma verileri yer almaktadır. İkinci katman; malzeme, süper iletken, lazer, kriyojenik, vakum ve güç elektroniği gibi etkinleştirici teknolojilerden oluşmaktadır. Üçüncü katmanda; örtü, divertör, mıknatıs, yakıt işleme, ısıtma, tanı ve bakım sistemleri gibi reaktöre özgü bileşenler bulunmaktadır. Dördüncü katman, bütün bu sistemlerin aynı tesiste birleştirilmesini sağlayan santral mühendisliği ve proje yönetimini kapsamaktadır. Son katmanda ise işletme, bakım, güvenlik, düzenleme, sertifikasyon ve söküm hizmetleri yer almaktadır (bk. İnfografik 6).

İnfografik 6: Füzyon Sanayi Ekosisteminin Katmanları



Söz konusu yapı, ekonomik değerin gelecekte yalnızca reaktör tasarımına sahip şirketlerde toplanmayacağına işaret etmektedir. Füzyon projeleri binlerce özel parçanın yüksek kalite standartlarında üretilmesini gerektirecektir. Bir ülke; özgün reaktör tasarımına sahip olmasa bile belirli bir süper iletken kablo, radyasyona dayanıklı sensör, vakum bileşeni, uzaktan bakım robotu veya güç dönüştürücü sistemde uluslararası tedarikçi hâline gelebilir. Havacılık, uzay ve fisyon nükleer sanayilerinde olduğu gibi güvenilirlik, sertifikasyon ve teslimat geçmişi, teknoloji kadar önemli bir rekabet unsuru olacaktır.

Büyük bilimsel projeler bu bakımdan birer sanayi öğrenme platformu işlevi görmektedir. ITER tedarikleri için geliştirilen üretim yöntemleri ve kalite güvence süreçleri, şirketlere başka yüksek teknoloji alanlarında da kullanabilecekleri yetkinlikler kazandırmıştır. Bir parçanın ITER veya benzeri bir projede kullanılabilmesi; teknik tasarımın başarılı olmasıyla birlikte malzeme izlenebilirliği, üretim belgeleri,

tahribatsız muayene, kalite yönetimi ve uluslararası sözleşme süreçlerinin karşılanmasını gerektirir. Bu deneyim, şirketlerin gelecekteki ticari füzyon pazarına girişini kolaylaştırabilir.

Standardizasyon yarışı da tedarik zincirinin stratejik boyutlarından biridir. Malzeme testlerinin nasıl yapılacağı, bileşen ömrünün hangi yöntemlerle hesaplanacağı, trityumun nasıl izleneceği ve reaktör güvenliğinin hangi ölçütlerle değerlendirileceği henüz bütünüyle yerleşmiş değildir. Bu standartların geliştirilmesine erken dönemde katılan ülkeler ve şirketler, gelecekteki teknik şartnameler üzerinde daha fazla etki sahibi olabilir. Geç katılan aktörler ise başka ülkelerin belirlediği standartlara uyum sağlamak zorunda kalabilir. **Bu açıdan standardizasyon, teknik uyumun ötesinde gelecekteki füzyon pazarına erişim koşullarını ve teknolojik rekabetin kurallarını şekillendiren bir güç alanıdır. Test sonuçlarının karşılıklı tanınması, sertifikasyon altyapıları ve teknik şartnamelerin oluşturulması gibi süreçlerde söz sahibi olan ülkeler, yeni teknolojik ekosistemin kurallarını şekillendiren aktörler hâline gelebilir.**

İnsan kaynağı, tedarik zincirinin bir başka temel unsurudur. Füzyon programları yalnızca plazma fizikçilerine ihtiyaç duymamaktadır. Malzeme bilimcileri, nükleer mühendisler, elektrik-elektronik ve makine mühendisleri, kimyacılar, yazılım geliştiriciler, veri bilimciler, kaynak ve imalat uzmanları, kalite mühendisleri, teknisyenler ve düzenleyici uzmanlar aynı ekosistem içinde çalışmaktadır. Birleşik Krallık'ın beceri programlarına, ABD'nin üniversite-laboratuvar iş birliklerine, Japonya ve Güney Kore'nin sanayi odaklı insan kaynağına yatırım yapması, bu ihtiyacın sonucudur. Uzun süreli teknoloji programlarında yetişmiş personelin korunması, tek seferlik tesis yatırımlarından daha kalıcı bir kapasite oluşturabilir.

Araştırma ve üretim faaliyetlerinin belirli bölgelerde yoğunlaşması da bilgi akışını hızlandırmaktadır. Culham, Hefei ve benzeri kümelenmelerde yer alan araştırma merkezleri, şirketler, tedarikçiler ve eğitim kurumları arasındaki coğrafi yakınlık; ortak projeleri ve iş gücü hareketliliğini kolaylaştırmaktadır. İleri teknoloji ekosistemlerindeki yenilik üretiminde yazılı sözleşmeler kadar araştırmacı ve mühendisler arasındaki günlük etkileşim de etkilidir. Bu nedenle füzyon politikaları; giderek tek bir tesis kurma yaklaşımından araştırma, üretim ve insan kaynağını aynı çevrede geliştiren kümelenme modeline yönelmektedir.

Füzyon teknolojilerinin stratejik niteliği, tedarik zincirinde açıklık ile güvenlik arasında denge kurulmasını da gerektirir. Uluslararası iş birlikleri maliyeti paylaşmakta ve bilimsel ilerlemeyi hızlandırmaktadır. Buna karşılık yüksek alanlı mıknatıslar, gelişmiş lazerler, nükleer malzemeler, yapay zekâ destekli kontrol ve hassas üretim gibi alanlar; ihracat kontrolü, fikrî mülkiyet ve araştırma güvenliği tartışmalarıyla kesişmektedir. Uluslararası rekabet yoğunlaştıkça ülkelerin, ortak araştırmayı sürdürürken kritik bilgi ve üretim kabiliyetlerini korumaya yönelik daha seçici politikalar geliştirmesi beklenebilir.

BÖLÜM 3

TÜRKİYE'NİN MEVCUT KONUMU VE OLASI MODELLER

Türkiye açısından füzyon enerjisinin önemi, kısa vadede elektrik üretimine sağlayacağı katkıdan ziyade uzun vadede ortaya çıkabilecek yeni bir teknoloji ve sanayi ekosistemine hangi kapasiteyle katılacağı sorusundan kaynaklanmaktadır. Günümüzde hiçbir ülkede ticari ölçekte füzyon elektriği üreten bir santral bulunmamaktadır. Baskın reaktör mimarisi, ilk santrallerin devreye girme tarihi ve üretilecek elektriğin maliyeti de kesinleşmemiştir. Bu belirsizlikler, Türkiye'nin füzyon alanını bütünüyle dışarıda bırakmasını gerektirmediği gibi yakın dönemde yüksek maliyetli bir ulusal reaktör projesine yönelmesini de irrasyonel kılmaktadır. **Benimsenecek strateji, teknolojik gelişmeleri takip etmenin ötesine geçmeli ancak ülkenin mevcut bilimsel ve endüstriyel kapasitesini aşan yatırımlardan kaçınmalıdır.**

Türkiye'nin enerji sistemi, yüksek dışa bağımlılık ve büyüyen elektrik talebi nedeniyle uzun vadeli teknoloji seçeneklerini izlemeyi gerekli kılmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2026 yılı açıklamalarında yıllık enerji ithalatı faturasının 60-70 milyar dolar arasında değiştiği ve toplam enerji ihtiyacının yaklaşık üçte ikisinin ithalatla karşılandığı belirtilmektedir.[48] Füzyonun bu maliyetinin yakın gelecekte azalması beklenmemektedir. Öte yandan 2030'lu ve 2040'lı yıllarda gelişebilecek bir füzyon sanayisinin bütünüyle dışında kalınması, enerji alanındaki mevcut bağımlılığa yeni bir teknoloji, ekipman ve mühendislik bağımlılığı ekleyebilir.

Türkiye'nin önündeki temel soru, "Ne zaman füzyon santrali kurabiliriz?" biçiminde dar bir takvim sorusu olarak ele alınmamalıdır. Daha gerçekçi soru, ticari füzyonun hangi tarihte ve hangi teknolojiyle ortaya çıkacağından bağımsız olarak Türkiye'nin bugün hangi yetkinlikleri geliştirmesi gerektiğidir. İnsan kaynağı, araştırma altyapısı, kritik bileşen üretimi, uluslararası programlara erişim ve teknoloji değerlendirme kapasitesi; bu sorunun başlıca unsurlarını oluşturmaktadır. Stratejinin başarısı, belirli bir cihazın satın alınmasından veya tek bir deney tesisinin kurulmasından önce, değişen teknolojik koşullar karşısında bağımsız değerlendirme yapabilecek bilimsel ve kurumsal kapasitenin oluşmasına bağlıdır.

Türkiye açısından füzyonun stratejik değeri, gelecekteki enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik uzun vadeli bir seçenek oluşturmasının yanı sıra gelişmekte olan teknoloji ekosisteminde bağımsız karar alma ve hareket kapasitesinin güçlendirilmesidir. Teknopolitik özerklik, füzyon sistemlerinin bütün bileşenlerini ulusal imkânlarla üretmek anlamına gelmemektedir. Kritik alt teknolojilerde yetkinlik geliştirilmesi, uluslararası araştırma ile üretim ağlarına nitelikli katılım sağlanması ve farklı teknolojik seçeneklerin bağımsız biçimde değerlendirilebilmesi; Türkiye'nin dışa bağımlılığını yönetmesine ve uluslararası iş birliklerinde daha güçlü bir konum elde etmesine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle füzyon programı, uzun vadeli enerji politikası kadar Türkiye'nin ileri teknoloji kapasitesini geliştirme ve stratejik özerkliğini güçlendirme hedefleriyle de ilişkilidir.

Türkiye'nin Mevcut Konumu

Türkiye'de füzyon araştırmaları; henüz sürekli, uzun yıllara sâri ve kurumsallaşmış bir ulusal program düzeyine ulaşmamıştır. Çalışmalar; daha çok üniversitelerdeki bireysel araştırma grupları, sınırlı sayıdaki deneysel faaliyetler, eğitim programları ve füzyonla ilişkili alt teknoloji projeleri üzerinden ilerlemektedir. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığının 2026-2028 Katılım Öncesi Ekonomik

Reform Programı, füzyon teknolojilerinin ulusal nükleer altyapının geliştirilmesi bakımından önem kazandığını belirtmekte ve TENMAK tarafından füzyon alanındaki araştırma ve geliştirme projelerinin desteklenmesini öngörmektedir.[49] TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Enstitüsünün düşük enerjili nükleer reaksiyonlar ve füzyon konularındaki eğitim faaliyetleri ile doktora sonrası araştırmacılara yönelik çağrıları da alandaki insan kaynağına yönelik ilk adımlar arasında değerlendirilebilir.[50]

Bu gelişmeler, füzyonun ulusal politika belgelerinde görünür hâle gelmeye başladığına işaret etmektedir. Ancak bütçesi, takvimi, sorumlu kurumları, teknoloji öncelikleri, uluslararası iş birliği modeli ve performans göstergeleri belirlenmiş kapsamlı bir program henüz bulunmamaktadır. **Türkiye, ITER'in üyeleri arasında da yer almamaktadır. Bu durum, büyük ölçekli füzyon altyapılarına ve ortak araştırma programlarına doğrudan erişimi sınırlandırarak araştırmacı ve şirketlerin uluslararası deneyim kazanmasını bireysel veya ikili iş birliklerine daha bağımlı hâle getirmektedir.**

Türkiye'nin füzyon alanındaki başlangıç kapasitesi, yalnızca doğrudan füzyon başlığı altında yürütülen projeler üzerinden ölçülemez. Nükleer fizik, hızlandırıcı teknolojileri, radyasyon ölçümü, ileri malzemeler, vakum sistemleri, güç elektroniği, lazer ve optik, süper iletkenlik, yapay zekâ, robotik ve hassas imalat alanlarında farklı kurumlara dağılmış bilgi ve altyapılar bulunmaktadır. Savunma ve havacılık sanayisinde gelişen sistem mühendisliği, yüksek güvenilirlikli elektronik, sensör, kompozit malzeme ve hassas üretim kabiliyetleri de füzyon teknolojileriyle kesişebilecek birikim sunmaktadır. Bununla birlikte bu kapasitenin füzyon koşullarındaki yeterliliği, insan kaynağı derinliği ve uluslararası standartlara uygunluğu henüz bütüncül biçimde ortaya konulmamıştır.

İlk ihtiyaç, Türkiye'nin hangi alanlarda güçlü veya zayıf olduğuna ilişkin varsayımlardan hareket etmek yerine doğrulanabilir bir kapasite envanteri hazırlamaktır. Üniversitelerde, kamu araştırma merkezlerinde ve şirketlerde bulunan hızlandırıcılar, lazer sistemleri, vakum odaları, kriyojenik altyapılar, yüksek gerilim sistemleri, radyasyon kaynakları, malzeme üretim ve karakterizasyon laboratuvarları, süper bilgisayarlar ve ileri üretim imkânları ortak bir veri tabanında toplanmalıdır. Altyapının sadece varlığı kaydedilmemeli; donanımların teknik özellikleri, operasyonel durumları, erişim koşulları, bu altyapıyı işletecek uzman personel kapasitesi ve füzyon araştırmalarındaki potansiyel kullanım alanları da kapsamlı biçimde analiz edilmelidir.

Benzer bir çalışma insan kaynağı için yürütülmelidir. Füzyon programı yalnızca plazma fizikçilerinin sayısına indirgenemez. Malzeme bilimcileri, nükleer mühendisler, elektrik-elektronik ve makine mühendisleri, kimyacılar, veri bilimciler, yazılım geliştiriciler, hassas imalat uzmanları, teknisyenler ve düzenleyici personel birlikte ele alınmalıdır. Türkiye'deki araştırmacıların uzmanlık alanları, yürüttükleri projeler, uluslararası bağlantıları ve kullanabildikleri altyapılar belirlenmeden büyük ölçekli bir yatırım programının insan kaynağı ihtiyacını doğru biçimde hesaplamak mümkün olmayacaktır.

Ulusal kapasite değerlendirmesinin bir başka boyutu sanayidir. Füzyon alanında kullanılabilecek birçok ürün bugün doğrudan füzyon etiketiyle üretilmemektedir. Yüksek kapasiteli güç kaynakları, vakum pompaları, özel kablolar, kriyojenik bileşenler, hassas mekanik parçalar, sensörler, robotik sistemler ve veri toplama elektroniği farklı sektörlerde faaliyet gösteren şirketler tarafından geliştirilmektedir.

Bu şirketlerin füzyon projelerine tedarik sağlayabilmesi için ürünlerin radyasyon, sıcaklık, vakum, manyetik alan, güvenilirlik ve kalite güvencesi bakımından yeni şartları karşılaması gerekir. Dolayısıyla kapasite envanteri, şirket isimlerinin listelenmesiyle sınırlı kalmayarak ürün ve süreçlerin hangi teknik yeterlilik düzeyinde bulunduğunu da göstermelidir.

Tablo 2: Türkiye'nin Füzyonla İlişkili Potansiyel Kapasite Alanları ve Temel Açıkları

Alan	Mevcut veya Potansiyel Kapasite	Temel Açık	İlk Değerlendirme İhtiyacı
Nükleer fizik ve hızlandırıcılar	Üniversiteler ve kamu araştırma altyapılarında deneyim	Altyapıların dağınık olması ve füzyon odaklı ortak program eksikliği	Cihaz, personel ve erişim envanteri
İleri malzemeler	Metal, seramik, kaplama ve kompozit araştırmaları	Füzyon nötronları ve yüksek ısı akısı altında test kapasitesinin sınırlı olması	Malzeme test ve nitelendirme fizibilitesi
Güç elektroniği	Enerji, savunma ve ulaştırma sektörlerinde gelişen sanayi kapasitesi	Yüksek güçlü darbeli sistemler ve füzyona özgü güvenilirlik standartları	Şirket ve ürün yeterlilik analizi
Vakum ve kriyojenik sistemler	Araştırma ve sanayi uygulamalarında parçalı kapasite	Büyük ölçek, uzun süreli işletme ve sistem entegrasyonu deneyimi	Mevcut tesislerin teknik performans analizi
Süper iletken mıknatıslar	Akademik çalışmalar ve sınırlı uygulama deneyimi	Yüksek alanlı mıknatıs tasarımı, kablo üretimi ve test altyapısı	Ulusal fizibilite ve ortaklık seçenekleri
Lazer ve optik	Savunma, sağlık ve araştırma uygulamalarında gelişen yetkinlik	Yüksek enerjili ve yüksek tekrarlı lazer sistemlerine erişim	Altyapı ve uluslararası erişim haritası
Sensör ve radyasyon ölçümü	Nükleer, sağlık ve savunma alanlarında deneyim	Füzyon ortamlarına uygun hızlı ve radyasyona dayanıklı sistemler	Prototip ve test programı
Yapay zekâ ve yüksek başarımlı hesaplama	Genişleyen araştırmacı ve yazılım ekosistemi	Füzyona özgü veri, model ve doğrulama altyapısına erişim	Ortak veri ve modelleme programı
Robotik ve uzaktan bakım	Savunma ve endüstriyel otomasyonda gelişen kapasite	Yüksek radyasyonlu ortamlarda ağır bileşen bakımı deneyimi	Görev ve demonstrasyon senaryoları
Hassas imalat ve kalite güvencesi	Savunma ve havacılık sanayisinde güçlü üretim kültürü	Füzyon projelerine özgü sertifikasyon ve tedarik geçmişi	Uluslararası standart ve tedarik analizi

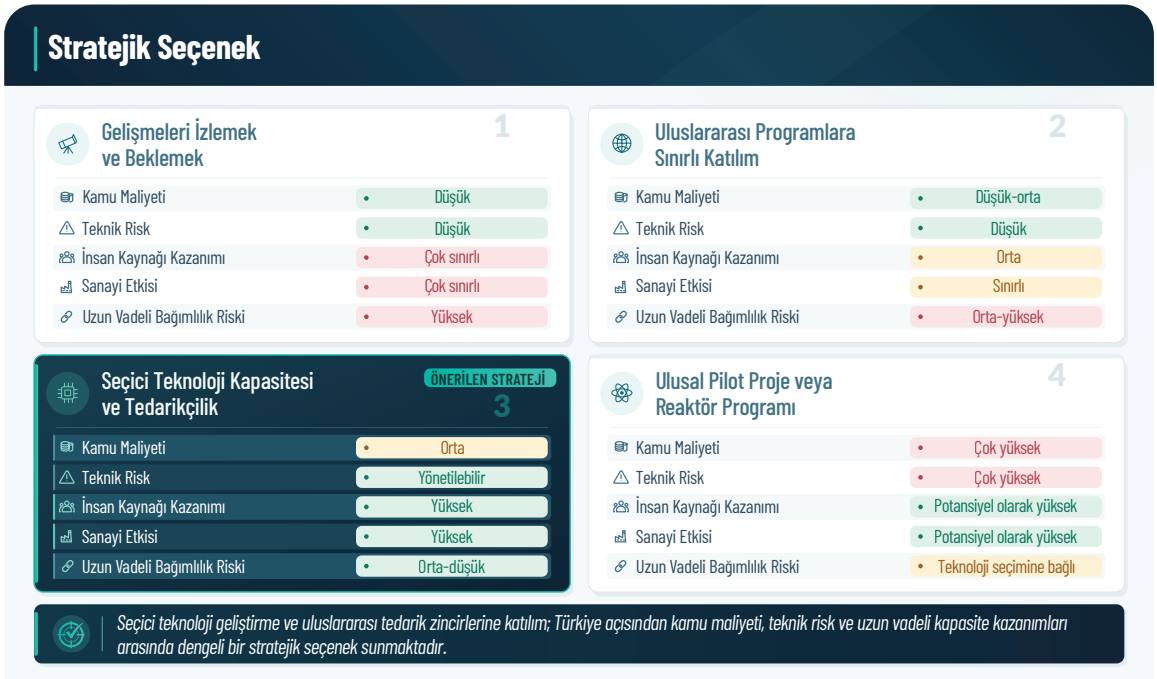
Tablo 2'deki değerlendirmeler başlangıç varsayımı niteliğindedir. Kesin öncelikler, ulusal envanter ve bağımsız teknik inceleme tamamlandıktan sonra belirlenmelidir. Mevcut kapasitenin olduğundan güçlü gösterilmesi kaynakların yanlış alanlara yönelmesine, olduğundan zayıf gösterilmesi ise kullanılabilecek altyapıların gözden kaçmasına yol açabilir.

Türkiye'nin Önündeki Stratejik Seçenekler

Türkiye'nin füzyon alanında benimseyebileceği yaklaşım tek bir seçenekten oluşmamaktadır. Kamu maliyeti, teknik risk, insan kaynağı kazanımı, sanayi etkisi ve uluslararası erişim bakımından farklı sonuçlar doğuracak dört temel seçenek bulunmaktadır.

1. **Gelişmeleri izlemek ve ticari teknolojinin olgunlaşmasını beklemek:** Bu yaklaşım, yakın dönemde düşük kamu harcaması gerektirir ve geleceği belirsiz teknolojilere kaynak ayrılması riskini azaltır. Buna rağmen bilimsel birikim, tedarik zinciri deneyimi ve insan kaynağı oluşturulamadığı için başarılı bir teknoloji ortaya çıktığında Türkiye, hazır sistem ve ekipman satın alan bir kullanıcı konumunda kalabilir. Teknoloji olgunlaştıktan sonra pazara girmek, standartların ve tedarik ilişkilerinin önceden kurulduğu bir alanda daha yüksek giriş maliyeti doğurabilir. Bu durum da dışa bağımlılığın artmasına sebep olacaktır.
2. **Uluslararası programlara sınırlı katılım ve araştırmacı hareketliliği üzerinden kapasite geliştirmek:** Büyük ulusal altyapılar kurulmadan da araştırmacıların yabancı laboratuvarlara erişmesi, ortak projeler yürütülmesi ve belirli uluslararası konsorsiyumlara katılım sağlanması mümkündür. Bu yöntem ilk seçeneğe göre daha fazla bilgi ve insan kaynağı kazandırır. Ancak yurt içinde deneysel ve endüstriyel bir karşılık oluşturulmadığında kazanılan bilginin kalıcı kurumsal kapasiteye dönüşmesi oldukça güçtür.
3. **Kritik alt teknolojilerde seçici kapasite geliştirme ve uluslararası tedarik zincirine katılım:** Bu modelde Türkiye, kısa vadede bütün bir füzyon reaktörü tasarlamaya yönelmez. Farklı reaktör mimarilerinin ortak ihtiyaç duyduğu malzeme, güç elektroniği, sensör, lazer, yazılım, vakum, kriyojenik, robotik ve ileri imalat alanlarından kendi kapasitesine uygun olanları seçer. Araştırma projeleri, prototipler ve şirket destekleri bu alanlarda yoğunlaştırılır. Uluslararası laboratuvar ve pilot projelerle ortaklıklar, geliştirilen bileşenlerin gerçekçi koşullarda test edilmesini sağlar. Bu yaklaşım, teknolojik belirsizlik karşısında seçenekleri açık tutarken füzyon dışındaki sektörlerde de kullanılabilecek yetkinlikler oluşturur.
4. **Ulusal reaktör inşa etme veya büyük ölçekli pilot proje başlatma:** Bu nitelikteki bir program; güçlü bir siyasi görünürlük, belirgin bir ortak hedef ve kapsamlı mühendislik öğrenmesi sağlayabilir. Buna karşılık milyarlarca dolara ulaşabilecek sermaye ihtiyacı, uzun geliştirme süresi, sınırlı insan kaynağı ve henüz kesinleşmemiş teknoloji seçimi önemli riskler doğurur. Gerekli alt sistemler ve araştırmacı tabanı oluşmadan başlatılan büyük bir tesis projesi, yüksek dışa bağımlılıkla ekipman satın alınmasına ve ulusal teknoloji kazanımının sınırlı kalmasına yol açabilir.

İnfografik 7: Türkiye'nin Füzyon Enerjisi Alanındaki Stratejik Politika Seçeneklerinin Karşılaştırılması



Türkiye'nin mevcut konumu bakımından üçüncü seçenek en dengeli yaklaşımı sunmaktadır. Bu seçenek, uluslararası programlara katılımı dışlamadan, ikinci seçeneğin araştırmacı ve altyapı erişimi avantajını ulusal teknoloji geliştirme programıyla birleştirmektedir. Böylece Türkiye hem uluslararası bilgi ağlarına bağlanabilir hem de yurt içinde kalıcı araştırma ve üretim kapasitesi oluşturabilir. Büyük ölçekli pilot proje kararı ise belirli bilimsel, teknik ve ekonomik eşikler aşıldıktan sonra yeniden değerlendirilebilir.

Seçici kapasite yaklaşımı pasif veya düşük iddialı bir strateji olarak görülmemelidir. Başarısı, çok sayıda küçük ve dağınık projeye kaynak dağıtmak yerine sınırlı sayıdaki teknoloji kümesinde uluslararası ölçekte sonuç üretmeye bağlıdır. Seçilecek alanların; akademik ilgi, mevcut insan kaynağı, sanayi tabanı, uluslararası ortaklık imkânı, yan kullanım potansiyeli ve ölçülebilir teknik hedefler üzerinden belirlenmesi gerekir.

Öncelikli Ulusal Teknoloji Kümeleri

Türkiye'nin füzyon programı, farklı reaktör tasarımlarına ayrı ayrı yatırım yapmak yerine bu tasarımların ortak ihtiyaçları etrafında yapılandırılmalıdır. İlk değerlendirmede dört teknoloji kümesi öne çıkmaktadır. Nihai öncelik sırası, ulusal kapasite envanteri ve uluslararası uzman değerlendirmesi sonrasında belirlenmelidir.

İleri Malzemeler ve Nükleer Teknolojiler

Füzyon santrallerinin ticari başarısı; büyük ölçüde yüksek nötron akısına, sıcaklık değişimlerine ve yoğun ısı yüklerine dayanabilecek malzemelerin geliştirilmesine bağlıdır. Yapısal alaşımlar, plazma ile temas eden yüzeyler, seramikler, kaplamalar, kompozitler ve işlevsel malzemeler bu alanın temelini oluşturmaktadır. Malzeme geliştirme süreci, yalnızca yeni bir alaşım üretmekten ibaret değildir. Üretim, kaynak, kaplama, karakterizasyon, ışınlama, mekanik test ve ömür tahmini aynı program içinde ele alınmalıdır.

Türkiye'de malzeme bilimi, metalurji, seramik ile yüzey teknolojileri alanında çeşitli üniversite ve araştırma altyapıları bulunmaktadır. Bu kapasitenin füzyon koşullarında kullanılabilmesi için araştırmaların uluslararası reaktör gereksinimleriyle ilişkilendirilmesi gerekir. İlk aşamada iyon ışınlama, termal çevrim, yüksek ısı akısı, korozyon ve mekanik dayanım testleri gibi erişilebilir çalışmalar yürütülebilir. Ayrıca daha ileri nötron testleri için uluslararası laboratuvarlarla ortaklıklar da kurulabilir. **Böylece çok yüksek maliyetli bir ulusal nötron tesisi kurulmadan önce araştırmacılar deneyim kazanabilir ve yerli malzemelerin performansı bağımsız altyapılarda doğrulanabilir.**

Nötron ve gama dedektörleri, hızlı veri toplama sistemleri, radyasyon görüntüleme ve kompakt parçacık kaynakları da bu kümenin parçası olarak değerlendirilebilir. Bu teknolojiler; füzyon dışında nükleer güvenlik, tahribatsız muayene, sağlık, savunma ve bilimsel araştırmalarda da kullanılmaktadır. Yan uygulama alanlarının bulunması, füzyonun ticari takviminin uzaması hâlinde yapılan yatırımların değerini korumasına katkı sağlar.

Yüksek Alanlı Mıknatıslar, Kriyojenik ve Güç Elektroniği

Manyetik hapsetme sistemleri; yüksek akım taşıyabilen süper iletken kablolara, güçlü mıknatıslara, kriyojenik soğutmaya ve hassas güç kontrolüne ihtiyaç duyar. Yüksek sıcaklık süper iletkenlerindeki gelişmeler, daha güçlü manyetik alanların daha kompakt sistemlerde üretilmesini mümkün hâle getirmiştir. Buna rağmen kablo üretimi, bobin tasarımı, mekanik dayanım, söndürme koruması, kriyojenik işletme ve mıknatısların uzun dönem güvenilirliği önemli araştırma alanlarıdır.

Türkiye'nin kısa vadede bütün bir füzyon mıknatıs sistemini üretmesi gerçekçi olmayabilir. Daha uygulanabilir yaklaşım; güç kaynakları, anahtarlama sistemleri, bobin izleme elektroniği, kriyojenik ölçüm, yüksek akım bağlantıları ve koruma sistemleri gibi alt bileşenlerden başlamaktır. Orta vadede küçük ve orta ölçekli yüksek alan bobin prototipleri geliştirilebilir. Bu çalışmaların; parçacık hızlandırıcıları, manyetik rezonans sistemleri, enerji depolama, elektrikli ulaşım ve bilimsel cihazlar gibi başka uygulamalara da katkı sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

Güç elektroniği, Türkiye'nin mevcut sanayi birikimiyle füzyon gereksinimlerinin kesişebileceği alanlardan biridir. Füzyon cihazları, kararlı doğru akım kaynaklarının yanında çok kısa sürede yüksek güç sağlayabilen darbeli sistemlere de ihtiyaç duymaktadır. Şirketlerin bu alana katılımı için genel amaçlı ürünlerin ötesine geçen teknik şartnameler, test düzenekleri ve uzun vadeli prototip sözleşmeleri hazırlanmalıdır. Üniversitelerin temel araştırma kapasitesiyle şirketlerin üretim ve kalite güvence deneyimi aynı projede birleştirilmelidir.

Lazer, Optik, Sensör ve Yapay Zekâ Destekli Dijital Kontrol

Yüksek güçlü lazerler ve hassas optik sistemler; eylemsiz füzyonun temel bileşenleri olmakla birlikte manyetik füzyonda plazma ısıtma, ölçüm ve tanı amacıyla da kullanılmaktadır. Lazer kaynakları, optik kaplamalar, hızlı kameralar, spektroskopi, interferometri ve parçacık dedektörleri; plazmanın sıcaklık, yoğunluk, bileşim ve kararlılığının ölçülmesini sağlar. Füzyon ortamındaki hızlı değişimler, sensörlerin yüksek zaman çözünürlüğüne sahip olmasını ve zorlu elektromanyetik koşullarda güvenilir çalışmasını zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'nin savunma, sağlık ve araştırma alanlarındaki lazer ve elektrooptik birikimi, füzyona yönelik seçici bir program için başlangıç sağlayabilir. Bununla birlikte yüksek enerjili füzyon lazerleri; çok özel optik, güç ve soğutma gereksinimlerine sahiptir. İlk aşamada; bütün bir lazer füzyon sürücüsü kurmaya yönelmek yerine optik kaplamalar, hedef görüntüleme, hızlı tanı sistemleri, ışın kontrolü, sensör elektroniği ve veri toplama gibi daha dar alanlara odaklanmak uygulanabilir görünmektedir. Yüksek güçlü uluslararası lazer tesislerine erişim, bu bileşenlerin gerçek deney koşullarında sınanmasına imkân verebilir.

Yapay zekâ ve yüksek başarımlı hesaplama, bu kümenin yatay bileşenidir. Füzyon deneyleri büyük hacimde ve yüksek hızda veri üretmektedir. Plazma kararsızlıklarının önceden tahmin edilmesi, deney parametrelerinin optimize edilmesi, sensör verilerindeki anormalliklerin belirlenmesi ve malzeme adaylarının taranması; makine öğrenmesinin kullanılabileceği alanlardır. Türkiye'nin bu alandaki araştırmacı tabanı, önemli bir imkân sunmaktadır. Ancak genel amaçlı yapay zekâ yetkinliği füzyon uygulamalarına kendiliğinden dönüşmez. Nitelikli veri kümelerine, fizik tabanlı modellere, deneysel doğrulamaya ve uluslararası araştırma gruplarıyla ortak çalışmaya ihtiyaç vardır.

Ulusal program kapsamında ortak bir füzyon veri ve modelleme platformu kurulabilir. Bu platform; açık bilimsel verileri, yerel deneylerden elde edilen sonuçları, simülasyon araçlarını ve doğrulanmış makine öğrenmesi modellerini bir araya getirebilir. Dijital ikiz çalışmaları da gerçek bir reaktör inşa edilmeden önce alt sistemlerin davranışını ve aralarındaki etkileşimi değerlendirmek için kullanılabilir. Böyle bir altyapı; fizik, veri bilimi ve mühendislik grupları arasında kalıcı iş birliği kurulmasına katkı sağlar.

Füzyon alanında veri ve hesaplama altyapılarının önemi, teknik verimlilik ve araştırma hızının ötesine geçmektedir. Deneysel verilere erişim, doğrulanmış simülasyon modellerinin geliştirilmesi ve yapay zekâ destekli kontrol sistemlerine ilişkin bilgi birikimi; gelecekteki teknolojik rekabette belirleyici yetkinlikler arasında yer alabilir. Bu nedenle ulusal veri ve modelleme kapasitesinin geliştirilmesi, Türkiye'nin uluslararası araştırma ekosistemine nitelikli katılımını güçlendirecektir. Açık bilim ve veri paylaşımı ilkeleri korunurken stratejik açıdan hassas bilgi, fikrî mülkiyet ve yerli teknoloji geliştirme kapasitesinin güvence altına alınması da programın tamamlayıcı unsurlarından biri olmalıdır.

Sistem Mühendisliği, Robotik, Vakum ve İleri İmalat

Füzyon santrali, farklı disiplinlerde geliştirilen binlerce bileşenin aynı güvenlik ve performans hedefleri altında çalışmasını gerektirir. Plazma sistemi, mıknatıslar, vakum, yakıt çevrimi, ısı çıkarma, güç üretimi,

kontrol, bakım ve güvenlik arasında güçlü bir karşılıklı bağımlılık bulunmaktadır. Bu nedenle sistem mühendisliği ve entegrasyon kapasitesi, tek tek bileşenlerin geliştirilmesi kadar önemlidir.

Türkiye'nin savunma, havacılık ve enerji projelerinde kazandığı sistem entegrasyonu deneyimi bu alana aktarılabilir. Ancak füzyon tesislerinin yüksek radyasyon, ultra yüksek vakum, kriyojenik sıcaklık ve yoğun manyetik alan gibi özel koşulları yeni tasarım ve test yöntemleri gerektirir. Başlangıç aşamasında gerçek bir reaktör yerine alt sistemleri temsil eden test platformları ve dijital modeller kullanılabilir. Vakum bileşenleri, uzaktan bakım araçları, robotik manipülatörler, radyasyona dayanıklı kamera ve elektronik sistemler; yerli sanayinin katılabileceği alanlar arasında yer almaktadır.

Uzaktan bakım, özellikle uzun vadeli bir teknoloji fırsatı sunmaktadır. Füzyon reaktörünün bazı bölgelerinde insan müdahalesi radyasyon nedeniyle sınırlı olacaktır. Ağır ve hassas bileşenlerin robotlarla çıkarılması, taşınması, incelenmesi ve yeniden yerleştirilmesi gerekir. Bu görevler için geliştirilecek teknolojiler; nükleer tesisler, uzay, deniz altı sistemleri, madencilik ve tehlikeli endüstriyel ortamlarda da kullanılabilir. Füzyon programı, robotik sistemlerin bu tür zorlu görevlerde test edilmesine yönelik bir gösterim ortamı sağlayabilir.

İleri imalat ve kalite güvencesi, sistem mühendisliğinin sanayiye açılan yönünü oluşturmaktadır. Füzyon bileşenlerinin; yüksek hassasiyet, malzeme izlenebilirliği, kaynak kalitesi, tahribatsız muayene ve uzun dönem güvenilirlik şartlarını karşılaması gerekir. Türkiye'deki şirketlerin uluslararası projelere tedarikçi olabilmesi için teknik ürün geliştirmenin yanında belgelendirme ve kalite süreçlerini de tamamlaması gerekecektir. Ulusal programın şirketlere yalnızca AR-GE hibesi sağlaması yeterli olmayabilir. Ayrıca uluslararası standarda uygun test, sertifikasyon ve referans ürün oluşturma desteği sunulmalıdır.

Yönetişim ve Finansman Modeli

Füzyon programının başarısı; hangi kurum tarafından yürütüleceğinden önce görevlerin nasıl tanımlandığına, kararların hangi kanıtlara dayandığına ve programın idari değişikliklerden ne ölçüde korunabildiğine bağlıdır. Türkiye'nin, başlangıç aşamasında bütün araştırmaları tek çatı altında toplayacak büyük bir kurum kurması kısa vadede gerekli görünmemektedir. Daha uygun yaklaşım; mevcut kurumların yetkinliklerini ortak hedefler etrafında birleştiren küçük, teknik kapasitesi yüksek ve uzun vadeli çalışma imkânına sahip bir koordinasyon birimi oluşturmaktır.

Füzyon programı, yalnızca tek bir kurumun araştırma gündemine indirgenmemelidir. İlgili bakanlıklar, TÜBİTAK, TENMAK ve gerektiğinde düzenleyici kurumlar arasında mevcut yetki ve sorumluluklar çerçevesinde eş güdüm sağlanmalı; üniversitelerin, araştırma merkezlerinin ve sanayi kuruluşlarının programın geliştirilmesi ve uygulanmasına katkı sunabileceği katılım mekanizmaları oluşturulmalıdır. **Koordinasyon biriminin temel görevi; bütün deneyleri kendi bünyesinde yürütmek yerine ulusal kapasiteyi izlemek, araştırma çağrılarını koordine etmek, ortak altyapılara erişimi düzenlemek, uluslararası iş birliklerini takip etmek ve programın performansını raporlamak olmalıdır.**

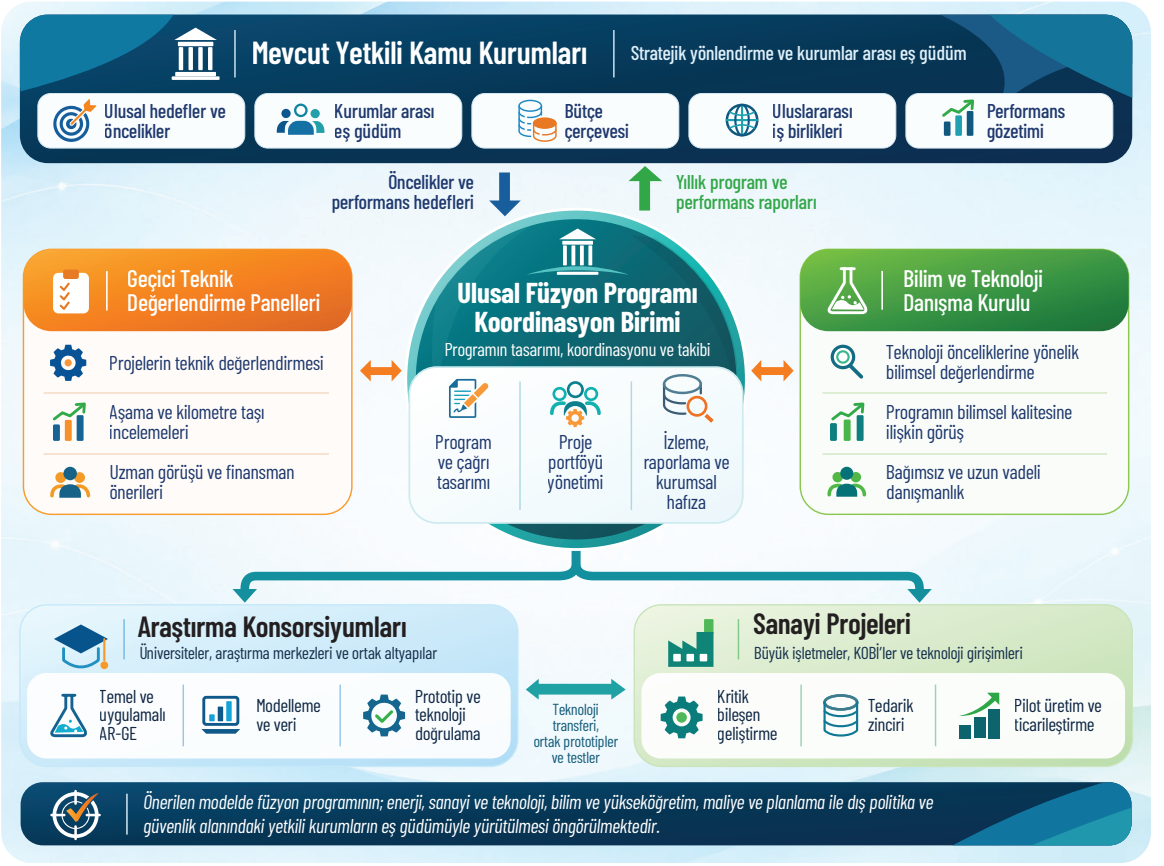
Yönetişim yapısının ikinci unsuru, bağımsız bir bilim ve teknoloji danışma kuruludur. Kurul; plazma fiziği, nükleer mühendislik, malzemeler, elektrik-elektronik, makine, lazer, yapay zekâ ve sanayi alanlarından

uzmanları içermelidir. Yurt dışında çalışan Türk araştırmacılar ile uluslararası uzmanların sınırlı sürelerle kurula katılması, ulusal projelerin uluslararası gelişmelerle karşılaştırılmasını sağlayacaktır. Kurulun görev süresi, çıkar çatışması kuralları ve değerlendirme ölçütleri açık biçimde belirlenmelidir.

Her araştırma alanı için kalıcı ve geniş kurullar oluşturmak yerine ihtiyaç duyulan konularda geçici teknik paneller oluşturulabilir. Örneğin yüksek alanlı mıknatıs çağrısı ile malzeme test altyapısının değerlendirilmesi farklı uzmanlıklar gerektirir. Teknik paneller; başlangıçta proje önerilerini değerlendirmeli, ara hedeflerde sonuçları incelemeli ve bir sonraki finansman aşamasına geçilip geçilmeyeceğine ilişkin görüş sunmalıdır. Dolayısıyla proje değerlendirmesi, yalnızca başlangıçtaki yazılı öneriyle sınırlı kalmayacak ve uygulama sürecinde elde edilen teknik kanıtlar üzerinden sürdürülecektir.

Yeni ve bağımsız bir füzyon araştırma merkezinin kurulması, programın ilk adımı olarak ele alınmamalıdır. Kapasite envanteri mevcut altyapıların yetersiz olduğunu gösterir, araştırma portföyü belirli bir büyüklüğe ulaşır ve ortak bir merkezin maliyet avantajı sağladığı doğrulanırsa bu seçenek ilerleyen aşamada değerlendirilebilir. Böyle bir merkez kurulması hâlinde de amaç, bütün projeleri aynı binada toplamak değil pahalı ve ortak kullanıma uygun altyapıları sağlamak olmalıdır.

İnfografik 8: Önerilen Ulusal Füzyon Programı Yönetişim Yapısı



Finansman modeli tek bir hibe türüne dayanmamalıdır. Temel bilim araştırmaları, insan kaynağı, uluslararası altyapı erişimi, prototip geliştirme ve sanayi ölçekleme faaliyetleri; farklı süre ve değerlendirme ölçütleri gerektirir. Üniversite araştırmaları için bilimsel kalite ve veri üretimi öne çıkarken sanayi projelerinde teknik performans, güvenilirlik, üretilebilirlik ve eş finansman önem kazanır. Büyük araştırma cihazları ise bağımsız fizibilite, yaşam döngüsü maliyeti ve kullanım planı olmadan finanse edilmemelidir.

Temel araştırma projelerine 3 ila 5 yıllık destek sağlanabilir. Bu süre, araştırmacı yetiştirme ve deneysel altyapı kurma bakımından yıllık bütçe yaklaşımına göre daha uygundur. Prototip ve sanayi projelerinde ise kilometre taşı esaslı finansman kullanılmalıdır. Teknik hedefler proje başlangıcında ölçülebilir biçimde tanımlanmalı ve sonraki finansman dilimleri bağımsız doğrulama sonucunda açılmalıdır. Başarısız olan her deney kaynak israfı olarak görülmemeli fakat başarısızlığın nedenleri belgelenmeli ve elde edilen veriler uygun koşullarda programın diğer katılımcılarıyla paylaşılmalıdır.

Finansmanın bir bölümü uluslararası araştırma altyapılarına erişim için ayrılmalıdır. Türkiye'nin kısa vadede kuramayacağı yüksek güçlü lazerler, nötron test tesisleri ve büyük plazma cihazları; ikili anlaşmalar veya konsorsiyum üyelikleri üzerinden kullanılabilir. Bu destek, yalnızca araştırmacının kısa süreli seyahatini karşılamakla sınırlı olmamalı; ortak deney tasarımı, veri hakkı, yayın, fikrî mülkiyet ve yerli bileşenlerin test edilmesi gibi somut çıktılara bağlanmalıdır.

İnsan kaynağı, programın ayrı bir bütçe bileşeni olmalıdır. Doktora ve doktora sonrası araştırmacılara rekabetçi ve uzun vadeli destek sağlanması, genç araştırmacıların kısa süreli proje personeli olarak görülmesini önleyebilir. Yurt dışındaki laboratuvarlarda çalışan Türk bilim insanlarıyla ortak görev, kısmi zamanlı çalışma, ortak doktora ve geri dönüş programları geliştirilebilir. Tek amaç, araştırmacıların Türkiye'ye kalıcı dönüşünü sağlamak olmamalı; uluslararası bilgi ağlarıyla sürekli bağ kurabilecek hareketli bir uzman havuzu oluşturulmalıdır.

Fikrî mülkiyet ve araştırma güvenliği de program tasarımının parçası olmalıdır. Açık bilim, temel araştırmanın ilerlemesi için gereklidir. Öte yandan bazı mıknatıs, lazer, güç elektroniği, nükleer ölçüm ve ileri imalat teknolojileri; ihracat kontrolü veya ticari gizlilik kapsamına girebilir. Proje sözleşmelerinde verinin sahipliği, yayın hakkı, patent paylaşımı, uluslararası ortaklık koşulları ve hassas bilginin korunması gibi konular başlangıçta düzenlenmelidir. Güvenlik yaklaşımı, bilimsel iş birliğini engelleyen genel bir kısıtlamaya dönüşmemeli ve risk düzeyine göre farklılaştırılmalıdır.

BÖLÜM 4

TÜRKİYE ULUSAL FÜZYON ENERJİSİ YOL HARİTASI

Türkiye'nin füzyon yol haritası, ölçülebilir kapasite ve teknoloji eşiklerine dayanmalıdır. Program her yıl kamuya açık bir performans raporuyla izlenmeli, iki yılda bir bağımsız uzman değerlendirmesine tabi tutulmalı ve her aşamanın sonunda daha kapsamlı bir karar değerlendirmesi yapılmalıdır. Sonraki dönemin bütçesi ve hedefleri bu değerlendirmelerde ortaya çıkan sonuçlara göre güncellenmelidir. Böylece program, uluslararası füzyon teknolojilerindeki değişime uyum sağlayabilir ve başarısız bir teknoloji seçimine uzun süre bağlı kalmaz.

Aşamalar ve Stratejik Odaklar

1. Aşama (2027-2028): Kapasiteyi Belirlemek ve Programı Kurmak

İlk iki yılın temel amacı, yeni ve yüksek maliyetli tesisler kurmak yerine Türkiye'nin gerçek kapasitesini ortaya koymaktır. Araştırma altyapısı, insan kaynağı, sanayi kabiliyeti ve uluslararası bağlantılar için ulusal envanter hazırlanmalıdır. Her altyapının teknik durumu, erişim koşulları ve füzyon araştırmalarında üstlenebileceği görev belirlenmelidir.

Aynı dönemde mevcut bir kurum bünyesinde Ulusal Füzyon Programı Koordinasyon Birimi oluşturulmalı, bağımsız bilimsel değerlendirme mekanizması ile veri ve proje izleme sistemi kurulmalıdır. Programın stratejik yönlendirmesi ve kurumlar arası eş güdümü, ilgili kamu kurumlarının mevcut yetki ve sorumlulukları çerçevesinde sağlanmalıdır. Öncelikli teknoloji kümeleri için ayrıntılı fizibilite çalışmaları yapılmalı ve araştırma çağrıları başlatılmalıdır. Çağrılar çok geniş başlıklar yerine belirli teknik sorulara odaklanmalıdır.

Uluslararası ortaklık planı da bu aşamada hazırlanmalıdır. Hangi laboratuvarlara, veri altyapılarına ve eğitim programlarına erişim gerektiği belirlenmeli; ikili anlaşmaların yanı sıra çok taraflı programlara katılımın maliyeti ve sağlayacağı haklar değerlendirilmelidir. İlk aşamanın sonunda Türkiye'nin hangi teknoloji alanlarında derinleşeceği, hangi altyapıları ortak kullanacağı ve hangi konularda dış erişime ihtiyaç duyduğu netleştirilmelidir.

Birinci aşamanın karar eşiği, kapasite envanterinin tamamlanması ve en az üç öncelikli teknoloji kümesinde uygulanabilir program tasarımının ortaya çıkmasıdır. Envanter yeterli insan kaynağı veya altyapı bulunmadığını gösterirse öncelik, büyük tesis yatırımına geçmek değil eğitim ve uluslararası erişim programlarını güçlendirmek olmalıdır.

2. Aşama (2029-2031): Seçilmiş Teknoloji Kümelerinde Derinleşmek

İkinci aşamada araştırma kaynakları, ulusal envanterle belirlenen sınırlı sayıdaki alana yoğunlaştırılmalıdır. Çok disiplinli araştırma konsorsiyumları kurulmalı ve bu sayede üniversiteler, kamu merkezleri ve şirketler ortak teknik hedefler üzerinde çalışmalıdır. Programların süresi, doktora öğrencisi yetiştirmeye ve deneysel sistem kurmaya imkân verecek şekilde uzun vadeli olmalıdır.

Bu dönemde; malzeme üretim ve test düzenekleri, orta ölçekli mıknatıs ve güç elektroniği prototipleri, lazer tanı sistemleri, radyasyon sensörleri, vakum bileşenleri, robotik bakım düzenekleri ve füzyon

veri platformu gibi çıktılar hedeflenebilir. Kurulacak altyapıların yalnızca tek bir proje tarafından kullanılmaması ve ulusal araştırmacılar ile şirketlere açık olması gerekir. Yeni cihaz yatırımları; mevcut altyapının kullanım oranı, bakım kapasitesi ve uzun vadeli işletme bütçesi dikkate alınarak yapılmalıdır.

Uluslararası ortak deneylerin sayısı ve niteliği artırılmalıdır. Araştırmacıların yalnızca yabancı tesislerde veri toplaması yerine deney tasarımına katılması, yerli üretilen parçaların test edilmesi ve sonuçlar üzerinde veri hakkı elde edilmesi hedeflenmelidir. Ortak doktora programları ve uzun süreli araştırmacı değişimleri, bu iş birliklerini kişisel bağlantıların ötesine taşıyabilir.

Sanayi katılımı ikinci aşamada daha görünür hâle gelmelidir. Şirketlere genel AR-GE teşvikleri yerine belirli teknik teslimatlara dayanan prototip sözleşmeleri verilebilir. Kamu araştırma kurumları test ve doğrulama altyapısı sağlarken şirketler üretim, kalite ve ölçekleme sorumluluğunu üstlenebilir. Aşama sonunda en az birkaç alt sistemin laboratuvar ortamında doğrulanmış olması ve uluslararası projelerde test edilmeye hazır hâle gelmesi beklenmelidir.

İkinci aşamanın karar eşiği; yetişmiş araştırmacı sayısı, tekrarlanabilir deneysel sonuçlar, doğrulanmış prototipler, uluslararası ortaklıklar ve özel sektör katkısı üzerinden değerlendirilmelidir. Yalnızca yayın sayısında artış olması, bir sonraki aşamaya geçiş için yeterli görülmemelidir.

3. Aşama (2032-2035): Prototipleri Ürüne ve Uluslararası Tedarik Kapasitesine Dönüştürmek

Üçüncü aşamanın hedefi, önceki dönemde geliştirilen bilgi ile prototipleri gerçekçi çalışma koşullarında sınamak ve uluslararası tedarik zincirine girebilecek ürünlere dönüştürmektir. Malzeme, sensör, vakum, güç elektroniği, robotik ve benzeri alt sistemler güvenilirlik, ömür, bakım ve üretilebilirlik bakımından test edilmelidir. Ürünlerin yalnızca laboratuvarda çalışması yeterli olmayacak; aynı zamanda kalite güvence belgeleri, tekrarlanabilir üretim ve uluslararası teknik şartlara uyum aranacaktır.

Bu aşamada uluslararası füzyon projeleriyle ortak gösterim programları kurulabilir. Yerli bir bileşenin yabancı bir tokamak, stellaratör, lazer tesisi veya malzeme test altyapısında kullanılması; ulusal program açısından önemli bir başarı göstergesi olacaktır. Böyle bir sonuç hem teknik doğrulama hem de şirketlerin gelecekteki ihalelere katılabilmesi için referans sağlayabilir.

Kamu desteğinin yapısı da değişmelidir. Temel bilim finansmanı sürerken başarılı alt sistemlerde şirket eş finansmanı, ilk müşteri mekanizması ve uzun dönemli satın alma niyeti gibi araçlar kullanılabilir. Rekabetçi çağrılarda aynı teknik soruna birden fazla çözüm geliştirilmesine izin verilebilir. Başarılı çözümler daha büyük bütçeyle ölçeklenirken hedeflerini karşılayamayan projeler sonlandırılmalı veya yeniden yapılandırılmalıdır.

Üçüncü aşamanın sonunda Türkiye'nin; uluslararası projelere ürün veya mühendislik hizmeti sağlayan şirketlere, deneysel sonuç üreten araştırma gruplarına ve bir sonraki döneme ilişkin bağımsız karar verebilecek kurumsal kapasiteye sahip olması beklenmelidir. Bu noktada programın başarısı, doğrulanmış teknoloji ve tedarikçi sayısıyla ölçülmelidir.

4. Aşama (2035 sonrası): Büyük Ölçekli Yatırım Kararını Kanıta Dayalı Biçimde Vermek

2035 sonrasında uluslararası füzyon teknolojilerinin bugüne göre daha açık bir görünüm kazanması beklenebilir. Bazı özel şirketler veya kamu programları; net tesis kazancı, uzun süreli işletme ya da elektrik üretimi bakımından ilerleme gösterebilir. Bazı yaklaşımlar ise teknik veya ekonomik nedenlerle geri planda kalabilir. Türkiye'nin büyük ölçekli yatırım kararı, bu yeni kanıtlar ile ilk üç aşamada oluşturduğu kapasite birlikte değerlendirilerek verilmelidir.

Bu aşamada dört yol gündeme gelebilir. Bunlar; uluslararası bir pilot projeye ortak olmak, belirli bir reaktör teknolojisine yatırım yapmak, güçlü olunan alt sistemleri temel alan ulusal entegrasyon programı geliştirmek veya füzyon santrali yatırımını erteleyerek tedarikçilik stratejisini sürdürmektir. Tercih; teknolojinin net enerji performansı, yatırım maliyeti, bakım ihtiyacı, yakıt çevrimi, düzenleyici olgunluğu, ulusal katkı oranı ve Türkiye'nin enerji sistemiyle uyumu üzerinden yapılmalıdır.

Büyük ölçekli yatırım kararı, geçmişte programa harcanan kaynakları haklı çıkarma amacıyla verilmemelidir. İlk aşamalarda yapılan yatırımlar sonucunda, santral projesine geçilmese bile başka sektörlerde kullanılabilecek insan kaynağı, laboratuvar ve ürünler meydana gelmiş olmalıdır. Böylece yol haritası tek bir nihai karara bağımlı olmaktan çıkar ve farklı teknolojik sonuçlara uyum sağlayabilir.

İnfografik 9: Türkiye İçin Önerilen Füzyon Yol Haritası



Uygulama ve Sorumluluk Çerçevesi

Programın uygulama aşamasında stratejik yönlendirme, günlük program yönetimi ve bilimsel-teknik değerlendirme birbirinden ayrılmalıdır. Böyle bir ayrım hem kamu sorumluluğunu netleştirir hem de bilimsel kararların kısa dönemli idari önceliklerden mümkün olduğunca bağımsız biçimde alınmasını sağlar. Uygulama çerçevesinin temel amacı, mevcut kurumlar arasındaki dağınık kapasiteyi ortak hedefler ve ölçülebilir çıktılar etrafında bir araya getirmektir.

İlk 12 Ay: Programın Kurumsal ve Bilgi Temelini Oluşturmak

Programın kabul edilmesini izleyen ilk üç ayda, Ulusal Füzyon Programı'nın yürütülmesinden sorumlu kurum belirlenmeli ve bu kurum bünyesinde oluşturulacak koordinasyon biriminin görevleri, çalışma usulleri ve diğer kamu kurumlarıyla iş birliği mekanizmaları tanımlanmalıdır. Bu dönemde öncelik, mevcut kurumların görevlerini birbirine bağlayan açık bir karar düzeni oluşturmaktır. Ulusal Füzyon Programı'nın hangi mevcut yapı bünyesinde çalışacağı, yıllık raporlama yükümlülüğü, bütçe hazırlama süreci ve bağımsız bilimsel değerlendirmeyle ilişkisi bu ilk dönemde karara bağlanmalıdır.

Üçüncü ve altıncı aylar arasında ulusal kapasite envanterinin ilk sürümü tamamlanmalıdır. Envanter yalnızca laboratuvar ve cihaz adlarını içeren bir liste olarak hazırlanmamalı; altyapıların teknik özellikleri, kullanım oranları, bakım durumu, erişim koşulları ve uzman personeliyle birlikte değerlendirilmelidir. Aynı çalışma, insan kaynağı ve sanayi için de yapılmalıdır. Araştırmacıların uzmanlık alanları, uluslararası bağlantıları ve şirketlerin mevcut ürünlerinin füzyon koşullarına ne ölçüde uyarlanabileceği kayda alınmalıdır. Bu çalışma, sonraki yatırım kararlarının başlangıç değerini oluşturacağı için kamuya açık yöntem ve doğrulanabilir veri ilkesiyle yürütülmelidir.

Altıncı ve dokuzuncu aylar arasında dört teknoloji kümesinin her biri için teknik fizibilite ve uluslararası karşılaştırma çalışmaları hazırlanmalıdır. Bu çalışmalar; Türkiye'nin hangi alanlarda kendi altyapısıyla ilerleyebileceğini, hangi testlerin yabancı tesislerde yapılması gerektiğini ve hangi yatırımların henüz ekonomik olmadığını ortaya koymalıdır. Aynı dönemde uluslararası laboratuvarlara erişim, ortak deney, veri kullanımı, fikrî mülkiyet ve yerli bileşenlerin yabancı tesislerde sınanması için hedef ortaklıklar belirlenmelidir.

Dokuzuncu ve on ikinci aylar arasında ilk hedefli araştırma ve prototip çağrıları açılmalı, 2028 sonrası için çok yıllı bütçe çerçevesi hazırlanmalı ve programın ilk kamu performans raporu yayımlanmalıdır. İlk çağrıların geniş ve genel başlıklar yerine ölçülebilir teknik sorulara yönelmesi önemlidir. Bunun sonucunda programın ilk yılı; hangi kapasitenin bulunduğunun bilinmesi, hangi boşlukların öncelikli olduğunun belirlenmesi ve bunlara karşı ilk somut araştırma araçlarının devreye alınmasıyla değerlendirilmiş olur.

İkinci yıl, ilk yılın envanter ve kurumsallaşma çalışmalarını gerçek program tercihlerine dönüştürme dönemi olmalıdır. 2028'in ilk yarısında; dört teknoloji kümesinin her biri için mevcut insan kaynağına, sanayi tabanına, uluslararası test imkânına ve yan kullanım potansiyeline dayanan önceliklendirme yapılmalıdır. Bu değerlendirme sonucunda bazı alanlarda ulusal araştırma programı

derinleştirilebilirken bazı alanlarda yabancı altyapıya erişim veya ortak geliştirme daha rasyonel bir seçenek olarak kabul edilebilir. Yol haritasının güvenilirliği, farklı alanlar arasında gerekçeli tercih yapılabilmesinden doğacaktır.

2028'in ikinci yarısında ilk çağrıların sonuçları, uluslararası erişim anlaşmaları ve envanter verileri birlikte değerlendirilerek 2029-2031 döneminin programı hazırlanmalıdır. Bu döneme geçiş için asgari kurumsal teslimatlar; doğrulanmış ulusal kapasite veri tabanının geliştirilmesi, düzenli çalışan koordinasyon birimi ve bağımsız değerlendirme sisteminin faaliyete geçirilmesi, ilk hedefli araştırma çağrılarının tamamlanması, öncelikli uluslararası tesislerle somut erişim mekanizmalarının kurulması ve sonraki üç yılın kamuya açıklanmış program-bütçe çerçevesinin oluşturulmasıdır. Böylece ilk yirmi dört ay, görünürlüğü yüksek fakat kurumsal karşılığı zayıf bir başlangıç dönemi olmaktan çıkarak sonraki yatırımların kanıta dayandığı bir hazırlık evresine dönüşebilir.

Kurumsal Görevlerin Ayrıştırılması

Füzyon programının stratejik yönlendirmesi, ilgili kamu kurumlarının mevcut görev ve yetkileri çerçevesinde yürütülmelidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı başta olmak üzere Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, TENMAK, TÜBİTAK ve diğer ilgili kuruluşlar arasında eş güdüm sağlanması önemlidir. Bu amaçla yeni bir sürekli kurul oluşturmak yerine mevcut idari mekanizmalardan ve ihtiyaç duyulan konularda kurumlar arası teknik çalışma gruplarından yararlanılması, daha uygulanabilir bir yaklaşım olacaktır.

Ulusal Füzyon Programı Koordinasyon Birimi ise icra ve koordinasyon birimi olarak çalışmalıdır. Envanterin güncellenmesi, çağrı takviminin hazırlanması, ortak altyapıların kullanımının izlenmesi, uluslararası anlaşmaların teknik takibi, performans göstergelerinin derlenmesi ve yıllık kamu raporunun hazırlanması; bu birimin temel görevleri arasında yer almalıdır. Birimin küçük tutulması ve kendi başına bütün araştırmaları yürütmeye çalışmaması, mevcut üniversite ve araştırma merkezlerinin kapasitesinden yararlanılması açısından önemlidir.

Bağımsız Bilim ve Teknoloji Danışma Kurulu, programın bilimsel ve teknik kalite güvencesini sağlamalıdır. Kurulun üyeleri uzmanlıkları temelinde görev yapmalı; bu üyelerin çıkar çatışması kuralları, görev süreleri ve değerlendirme ölçütleri kamuya açık olmalıdır. Proje ve altyapı değerlendirmelerinde ihtiyaç duyulan uzmanlık alanları değişeceği için kalıcı geniş komiteler yerine süreli teknik panellerden yararlanılması daha işlevsel olacaktır. Bu yapı içinde stratejik karar ile bilimsel değerlendirme birbirinden ayrılırken nihai kamu sorumluluğu da görünür kalacaktır. Danışma kurulu, ayrı bir tüzel kişiliğe veya idari karar yetkisine sahip olmayan, bilimsel değerlendirmelerini bağımsız biçimde yürüten bir uzman mekanizması olarak yapılandırılmalıdır.

Söz konusu kurumsal yapının işleyebilmesi için yetki ve sorumlulukların yanı sıra hesap verebilirlik mekanizmaları da açık biçimde tanımlanmalıdır. Programın stratejik yönlendirmesi ve kamu kaynaklarının tahsisine ilişkin kararlar, ilgili kamu kurumlarının mevcut yetkileri çerçevesinde alınmalı;

koordinasyon birimi uygulama takvimi, izleme ve raporlamadan, Bilim ve Teknoloji Danışma Kurulu ise bilimsel değerlendirmelerin niteliği ve çıkar çatışmalarının yönetiminden sorumlu olmalıdır. Yıllık raporda tamamlanan faaliyetlerin, ertelenen hedeflerin, bütçe sapmalarının ve durdurulan projelerin gerekçelerinin de açıklanması; uzun vadeli bir teknoloji programında kurumsal güvenin ve hesap verebilirliğin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Finansmanın Aşamalı ve Çok Yıllı Kurulması

Füzyon programının ilk yıllarında finansman yaklaşımı, büyük ölçekli yeni tesis kurmaktan önce mevcut kapasitenin kullanılmasına ve kritik boşlukların kapatılmasına yönelmelidir. Gerekli bütçe tahsisleri yapılmak kaydıyla 2027 yılı başlangıç faaliyetlerinin; TENMAK ve TÜBİTAK araştırma araçları, ilgili bakanlık programları ve mevcut kamu yatırım mekanizmaları üzerinden başlatılması değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, ilk yılın yalnızca yeni bir bütçe kaleminin oluşturulmasını bekleyerek geçirilmesini önlerken daha büyük yatırımların ulusal envanter ve fizibilite sonuçlarına dayanmasını sağlar.

Temel bilim, insan kaynağı, uluslararası altyapıya erişim ve sanayi prototipleri aynı finansman mantığıyla desteklenmemelidir. Temel araştırmada 3 ila 5 yıllık süreklilik, doktora ve doktora sonrası insan kaynağının yetişmesi bakımından önem taşırken mühendislik ve sanayi projelerinde sonraki bütçe dilimlerinin doğrulanmış teknik kilometre taşlarına bağlanması daha uygun olacaktır. Büyük cihaz ve tesis yatırımlarında ise yaşam döngüsü maliyeti, yıllık işletme bütçesi, kullanıcı tabanı ve uluslararası alternatiflere erişim maliyeti gibi konular bütüncül olarak değerlendirilmeden yatırım kararı verilmemelidir.

2028 sonunda tamamlanacak kapasite envanteri ve ilk proje sonuçları, 2029-2031 dönemi için gerçekçi bir bütçe zarfının hazırlanmasına temel oluşturmalıdır. Böylece bütçe, önceden belirlenmiş tek bir toplam rakamın yıllara dağıtılması yerine hangi teknoloji kümesinin hangi ölçülebilir kapasiteyi üretebildiğine göre kademeli biçimde büyüyebilir veya daraltılabilir. Bu yaklaşım, teknolojik belirsizlik altında kamu kaynaklarının daha esnek kullanılmasına imkân verir.

Finansman sorumluluğu da tek bir kuruma yüklenmemelidir. Programın çok yıllı kaynak ihtiyacı ve yatırım öncelikleri, koordinasyon biriminin hazırlayacağı teknik değerlendirmeler doğrultusunda ilgili kamu kurumlarının mevcut bütçe ve karar alma süreçlerinde ele alınmalıdır. Koordinasyon birimi ise her teknoloji kümesi için yıllık uygulama, kaynak ihtiyacı ve performans planlarını hazırlamalıdır. Temel araştırma ve insan kaynağı desteklerinde TÜBİTAK ve TENMAK gibi mevcut araştırma kurumlarından, sanayi ölçekleme ve ürünleştirme aşamasında ise ilgili bakanlıkların yatırım ve teşvik mekanizmalarından yararlanılması mümkündür. Büyük altyapı kararlarının ise Strateji ve Bütçe Başkanlığı perspektifinden yaşam döngüsü maliyeti ve alternatif kullanım değeriyle birlikte ele alınması gerekir. Bu minvalde bir görev paylaşımı, füzyon programının ayrı ve kapalı bir bütçe adasına dönüşmesine engel olacak; mevcut kamu araçlarının ortak bir stratejik hedef etrafında birleştirilmesine imkân verecektir.

Performans Göstergeleri, Şeffaflık ve Bağımsız Değerlendirme

Programın başarısı yalnızca yayın ve proje sayısıyla ölçülmemelidir. 2027 kapasite envanteri başlangıç değerlerini belirledikten sonra 2028, 2031 ve 2035 için sayısal hedefler kamuya açıklanmalıdır. İzlenecek göstergeler arasında; füzyonla doğrudan ilişkili doktora ve doktora sonrası araştırmacı sayısı, yabancı tesislerde yürütülen ortak deneyler, uluslararası koşullarda test edilen yerli bileşenler, teknoloji hazırlık seviyesinde ilerleme gösteren prototipler, uluslararası füzyon projelerine tedarik yapan şirketler, ilgili kalite ve sertifikasyon süreçlerini tamamlayan firmalar ve ortak patent ya da lisanslanan teknolojiler yer alabilir.

Koordinasyon birimi tarafından her yıl hazırlanan performans raporu, programdan sorumlu kurum aracılığıyla kamuya açıklanmalı; program iki yılda bir ulusal ve uluslararası uzmanların katıldığı bağımsız değerlendirmeye tabi tutulmalıdır. Bu iki yıllık değerlendirme, mevcut aşamaların sonunda yapılacak daha kapsamlı karar değerlendirmelerinin yerine geçmemeli; aşamalar arasında erken uyarı ve yön düzeltme mekanizması işlevi görmelidir. Başarısız projeler bütünüyle olumsuz sonuç olarak değerlendirilmemeli ancak başarısızlığın teknik nedenleri ve öğrenilen dersler kayıt altına alınmalıdır. Bu nitelikteki bir raporlama kültürü, uzun vadeli teknoloji programlarında kamu güveni kadar kurumsal öğrenme açısından da önemlidir.

İlk iki yıl için bütün teknoloji alanlarında şimdiden sayısal bilimsel başarı hedefleri koymak doğru olmayabilir çünkü başlangıç düzeyi henüz bilinmemektedir. Fakat süreç hedefleri bugünden tanımlanabilir. 2027 sonunda kapasite veri tabanının ilk sürümünün yayımlanması, yönetişim yapılarının çalışır hâle gelmesi, öncelikli uluslararası erişim görüşmelerinin başlatılması ve ilk hedefli çağrıların açılması; 2028 sonunda ise envanterin doğrulanması, dört teknoloji kümesi için fizibilite raporlarının tamamlanması, ilk bağımsız değerlendirme sonuçlarının kamuya açıklanması ve 2029-2031 programının karara bağlanması gibi konular programın somut başlangıç ölçütlerini oluşturmalıdır. Bilimsel ve endüstriyel sayısal hedefler ise bu başlangıç değerleri görüldükten sonra belirlenmelidir.

Düzenleyici ve Hukuki Hazırlık

Türkiye'nin füzyon teknolojilerine ilişkin düzenleyici yaklaşımı, büyük bir tesis başvurusu ortaya çıktıktan sonra ele alınacak bir konu olarak kalmamalıdır. İlk 12 ay içinde Nükleer Düzenleme Kurumu ve ilgili kamu kurumlarının katılımıyla füzyon tesisleri, trityum kullanımı, nötron kaynakları, radyasyon güvenliği, yüksek güçlü lazerler ve çift kullanımlı bazı teknolojiler bakımından mevcut mevzuatın hangi alanlarda yeterli olduğu ve hangi alanlarda yeni düzenlemeye ihtiyaç duyulabileceği ortaya konulmalıdır. Bu çalışma, henüz seçilmemiş bir reaktör tasarımına özgü ayrıntılı bir lisans rejimi kurmaktan ziyade gelecekte karşılaşılabilecek düzenleyici boşlukları önceden görünür hâle getirmeyi amaçlamalıdır.

Düzenleyici hazırlığın erken başlaması, güvenlik standartlarının gevşetilmesi anlamına gelmez. Aksine teknik risk ile düzenleyici yük arasında daha doğru bir ilişki kurulmasına imkân verir. Füzyonun fisyon reaktörlerinden farklı risk özellikleri bulunması, hangi hükümlerin doğrudan uygulanacağı ve hangi alanlarda teknolojiye özgü yaklaşım geliştirileceği konusunda bağımsız bir hukuki ve teknik incelemeyi gerekli kılmaktadır.

Düzenleyici hazırlığın ulusal enerji politikasıyla ilişkisi de açık tutulmalıdır. Füzyon; 2027-2035 döneminde Türkiye'nin mevcut elektrik arzı, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, şebeke, depolama veya fisyon yatırımlarının yerine geçecek yakın dönemli bir seçenek değildir. Ulusal planlamada füzyon, ticari takvimi belirsiz fakat gerçekleşmesi hâlinde enerji sistemi ve ileri sanayi üzerinde uzun dönemli etkiler yaratabilecek bir teknoloji hazırlık alanı olarak konumlandırılmalıdır. Bu ayrım, füzyona yönelik AR-GE yatırımlarının bugünkü enerji politikası ihtiyaçlarıyla gereksiz bir rekabete sokulmasını önlerken gelecekte ortaya çıkabilecek bir teknoloji pazarına hazırlığı da meşru bir kamu politikası hedefi hâline getirir.

Düzenleme de aynı aşamalı mantıkla ilerleyebilir. İlk aşamada mevcut mevzuatın boşlukları ve kurumlar arası yetki sınırları belirlenmeli; ikinci aşamada araştırma tesisleri, trityum, nötron kaynakları ve yüksek güçlü lazerler gibi alanlar için genel güvenlik ile izin ilkeleri netleştirilmelidir. Reaktör veya pilot tesis ölçeğinde ayrıntılı lisanslama ise ancak belirli bir teknoloji seçeneği ve gerçek bir proje ortaya çıktığında geliştirilmelidir. Bunun sonucunda Türkiye, ne henüz var olmayan bir tesis için ağır ve erken bir düzenleyici yapı kurmuş olacak ne de teknoloji somutlaştığında kurumsal hazırlıksızlıkla karşılaşacaktır.

Uluslararası Erişim ve Ortaklıkların Somutlaştırılması

Türkiye'nin ITER üyesi olmaması, uluslararası iş birliği seçeneklerini bütünüyle ortadan kaldırmamaktadır. ITER, üye olmayan ülkelerle teknik iş birliği modelleri geliştirmiş; Avustralya, Kazakistan ve Kanada ile farklı kapsamda anlaşmalar imzalamıştır. Türkiye açısından da benzer modellerin uygulanabilirliği; sağlayacağı teknik haklar, mali yükümlülükler ve yerli araştırmacı ile şirketlere açacağı erişim bakımından incelenmelidir. Bu değerlendirme yalnızca ITER ile sınırlı tutulmamalı; Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) koordineli araştırma projeleri, ikili laboratuvar anlaşmaları ve Avrupa'daki araştırma programlarına erişim imkânları birlikte ele alınmalıdır. Türkiye'nin Euratom Araştırma ve Eğitim Programı ve EUROfusion ile olası erişim kanalları ise hukuki statü ve program koşulları bakımından ayrıca doğrulanmalıdır.

Uluslararası ortaklıkların başarısı, araştırmacı seyahatlerinin sayısıyla ölçülmemelidir. Ortak deney tasarımı, veri hakkı, uzun süreli araştırmacı yerleşimi, ortak doktora, yerli prototiplerin yabancı tesislerde test edilmesi ve Türk şirketlerinin tedarik zincirine girmesi daha güçlü göstergelerdir. Ortak seçerken teknik tamamlayıcılık, fikrî mülkiyet düzeni, ihracat kontrolü riski, veri paylaşımı ve uzun vadeli kurumsal sürdürülebilirlik birlikte değerlendirilmelidir.

Uluslararası ortaklıkların tek bir üyelik modeli üzerinden düşünülmemesi önemlidir. Türkiye için kısa vadede araştırmacı ve veri erişimi sağlayan ikili laboratuvar anlaşmaları; belirli deney ve ölçüm kampanyalarına katılım, yerli prototiplerin yabancı tesislerde test edilmesi; ortak doktora ve uzun süreli araştırmacı görevlendirmeleri; uygunluk koşulları elverdiğinde çok taraflı araştırma programlarına katılım ve daha ileri aşamada büyük altyapılarla kurumsal ortaklık gibi birbirini izleyen farklı düzeyler düşünülebilir. Bu kademeli yaklaşım, uluslararası iş birliğini sembolik ziyaretlerden çıkarıp Türkiye'de kalıcı kapasite üreten bir öğrenme ve doğrulama mekanizmasına dönüştürmeyi amaçlamalıdır.

Amiral Proje Adayları

Ulusal kapasite envanteri tamamlanmadan kesin tesis kararları verilmemelidir ancak teknoloji kümelerini görünür ve sınanabilir hedeflere dönüştürmek amacıyla sınırlı sayıda amiral proje adayı tanımlanabilir. Bunlar arasında füzyon koşullarına yönelik malzeme nitelendirme ve yüksek ısı akısı test kapasitesi; küçük ve orta ölçekli yüksek alan bobinleri ile güç elektroniğini birlikte sınayacak bir test düzeneği; nötron ve gama ölçümü, hızlı veri toplama ve radyasyona dayanıklı elektronik için ortak bir tanı platformu; robotik uzaktan bakım ve dijital ikiz uygulamalarını birleştiren bir demonstrasyon ortamı; açık bilimsel veriler, yerli deney sonuçları ve doğrulanmış modelleme araçlarını bir araya getirecek ulusal füzyon veri platformu yer alabilir.

Bahsi geçen projelerin hiçbiri, envanterden bağımsız olarak otomatik yatırım kararı olarak görülmemelidir. Her aday proje için mevcut altyapı, uluslararası alternatif, başlangıç ve hedef teknoloji hazırlık seviyesi, insan kaynağı, işletme maliyeti ve füzyon dışındaki kullanım alanları karşılaştırılmalıdır. Amiral proje yaklaşımının amacı, büyük bütçeli sembolik tesisler oluşturmaktan ziyade Türkiye'nin belirli teknik alanlarda görünür ve uluslararası ölçekte sınanabilir ürünler geliştirmesine odak sağlamaktır.

Senaryo ve Risk Yönetimi

Yol haritası, uluslararası füzyonun tek bir ticari takvimde ilerleyeceği varsayımına dayanmamalıdır. Erken ticarileşme senaryosunda 2030'lu yılların ortasında pilot veya ilk ticari tesislerin ortaya çıkması, Türkiye'nin prototip doğrulama ve tedarikçi olma programını hızlandırmasını gerektirebilir. Daha kademeli bir gelişim senaryosunda mevcut 2027-2035 aşamaları korunabilir. Ticarileşmenin 2050 sonrasına uzandığı bir senaryoda ise füzyon programının malzeme, mıknatıs, lazer, robotik, veri ve nükleer ölçüm gibi diğer sektörlerde de karşılığı bulunan alanlara ağırlık vermesi, yatırımların ekonomik değerini koruyacaktır.

Risk yönetimi, teknik ve ekonomik belirsizliklerin yanında füzyon alanındaki jeopolitik ve teknopolitik gelişmeleri de kapsamalıdır. Kritik bileşen ve malzemelerin sınırlı sayıda tedarikçiye bağımlı olması, uluslararası araştırma altyapılarına erişim koşullarının değişmesi, teknoloji transferi ve ihracat kontrollerinin sıkılaşması veya belirli teknolojik standartların yaygınlaşması; Türkiye'nin uzun vadeli hareket alanını etkileyebilir. Bu nedenle teknoloji ve tedarik zincirlerindeki değişimler düzenli olarak izlenmeli; uluslararası ortaklıkların çeşitlendirilmesi, alternatif tedarik imkânlarının geliştirilmesi ve yerli teknoloji kapasitesinin güçlendirilmesi risk yönetiminin tamamlayıcı araçları olarak değerlendirilmelidir.

Programın risk kaydı; beyin göçü, bütçe sürekliliği, tek bir teknoloji veya ortağa aşırı bağımlılık, ihracat kontrolleri, kurulan altyapıların düşük kullanım oranı, kritik uzmanlığın birkaç kişide yoğunlaşması ve uluslararası tedarik standartlarına geç uyum sağlanması gibi başlıkları içermelidir. Her risk için sorumlu birim, erken uyarı göstergesi ve azaltma yöntemi tanımlanmalıdır. Risk kaydının yıllık performans raporuyla birlikte güncellenmesi, yol haritasını statik bir belge olmaktan çıkararak öğrenen bir kamu programına dönüştürebilir.

Karar Kapıları

Programın, aşamalar arasında otomatik biçimde ilerlememesi gerekir. 2028 sonunda birinci karar kapısı; ulusal envanterin tamamlanması, yönetişim mekanizmasının çalışması ve en az üç teknoloji kümesinde uygulanabilir programların oluşması üzerinden ele alınmalıdır. 2031 sonunda ikinci karar kapısı; yetişmiş insan kaynağı, tekrarlanabilir deneysel sonuç, doğrulanmış prototip ve uluslararası ortaklıkların gerçek çıktıları üzerinden verilmelidir. 2035 sonunda ise üçüncü karar kapısı, uluslararası koşullarda sınanmış yerli teknoloji ve tedarikçi sayısı ile uluslararası füzyon teknolojisinin geldiği düzey birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Her karar kapısında üç sonuç mümkün olmalıdır: programın mevcut yönüyle devam etmesi, hedef ve araçların yeniden düzenlenmesi veya yeterli teknik ve ekonomik gerekçe bulunmayan bir yatırım hattının durdurulması. Bu yaklaşım, daha önce harcanmış kaynakların yeni yatırımları otomatik olarak haklı çıkardığı düşüncesinden kaçınmayı sağlayacaktır.

Karar kapılarına ilişkin teknik değerlendirmeler koordinasyon birimi tarafından hazırlanmalı ve bağımsız uzman görüşleriyle desteklenmelidir. Programın devamına, yeniden yapılandırılmasına veya belirli yatırımların sonlandırılmasına ilişkin kararlar ise ilgili kamu kurumlarının mevcut yetki ve bütçe süreçleri çerçevesinde alınmalıdır.

SONUÇ

SONUÇ

Füzyon enerjisi, uzun yıllar boyunca bilimsel potansiyeli yüksek ancak ticari kullanımı uzak bir teknoloji olarak değerlendirilmiştir. Son dönemde manyetik hapsetme deneylerinde plazma performansının gelişmesi, lazer füzyonunda ateşleme eşiğinin aşılması, yüksek sıcaklık süper iletkenlerinin kullanıma girmesi ve özel şirketlerin daha büyük prototipler geliştirmesi; bu değerlendirmeyi kısmen değiştirmiştir. Füzyon artık sadece temel fizik araştırmalarının konusu olarak görülmemekte; enerji güvenliği, ileri sanayi, stratejik teknoloji ve uluslararası rekabetin kesişiminde yer almaktadır.

Söz konusu ilerlemelere rağmen ticari füzyonun temel belirsizlikleri devam etmektedir. Deneysel bir sistemde yüksek plazma veya hedef kazancı elde edilmesi, santral ölçeğinde net elektrik üretimini tek başına sağlamamaktadır. Malzeme ömrü, trityum çevrimi, örtü sistemleri, ısı çıkarma, bakım, yardımcı güç tüketimi, üretilebilirlik ve maliyet gibi sorunların aynı tesis içinde çözülmesi gerekmektedir. Günümüzde hiçbir füzyon tesisi, bu unsurların tamamını sürekli ve ekonomik elektrik üretimi koşullarında bir araya getirmiş değildir. Bu nedenle şirketlerin açıkladığı takvimler, yatırım miktarları ve elektrik alım anlaşmaları; önemli sinyaller olmakla birlikte ticari olgunluğun kanıtı olarak değerlendirilmemelidir.

Uluslararası rekabetin bugünkü aşamasında asıl odak; füzyon elektriğinin satışından önce bilimsel bilgi, insan kaynağı, araştırma altyapısı ve tedarik zincirleri üzerinedir. ABD kamu laboratuvarlarıyla özel şirketleri kilometre taşı esaslı programlarda bir araya getirmekte; Birleşik Krallık ulusal pilot proje hedefini beceri ve sanayi politikasıyla desteklemekte; Çin büyük araştırma ve mühendislik altyapıları kurmaktadır. Almanya standardizasyon ve ileri imalata; Japonya hassas üretim, teknoloji çeşitliliği ve tedarik zincirine; Güney Kore ise dijital sistemler ve ihracat kapasitesine ağırlık vermektedir. AB ve ITER ise çok taraflı araştırma altyapısı, ortak tedarik ve maliyet paylaşımı üzerinden farklı bir model sunmaktadır. Bu örnekler, ülkelerin füzyona aynı noktadan girmediğini ve mevcut üstünlüklerini gelecekteki füzyon ekonomisine taşımaya çalıştığını göstermektedir.

Türkiye'nin de başka ülkelerin programlarını bütünüyle kopyalaması yerine kendi bilimsel ve endüstriyel kapasitesine uygun bir konum belirlemesi önem taşımaktadır. Mevcut koşullarda büyük ölçekli bir ulusal füzyon reaktörü programına yönelmek; yüksek maliyet, sınırlı insan kaynağı ve belirsiz teknoloji seçimi nedeniyle önemli riskler taşımaktadır. Gelişmeleri yalnızca dışarıdan izlemek ise Türkiye'nin gelecekte hazır teknoloji ve ekipman satın alan bir kullanıcı olarak kalmasına yol açabilir. Bu iki uç arasında en rasyonel seçenek, kritik alt teknolojilerde seçici kapasite geliştirmek ve uluslararası araştırma ile tedarik zincirlerine aşamalı biçimde katılmaktır.

Bu stratejinin merkezinde, belirli bir reaktör mimarisini seçmek değil farklı füzyon sistemlerinin ortak ihtiyaç duyduğu yetkinlikler yer almalıdır. İleri malzemeler, nükleer ölçüm, yüksek alanlı mıknatıslar, kriyojenik sistemler, güç elektroniği, lazer ve optik, sensörler, yapay zekâ destekli kontrol, robotik, vakum teknolojileri ve hassas imalat; bu kapsamda öne çıkmaktadır. Söz konusu alanların enerji, savunma, uzay, sağlık ve ileri üretim gibi başka sektörlerde de karşılığının bulunması, füzyonun ticari takviminin uzaması hâlinde yatırımların değerini korumasını sağlayacaktır.

Türkiye'de farklı kurumlarda bulunan altyapı ve insan kaynağının gerçek durumu henüz bütüncül biçimde ortaya konulmamıştır. Bu nedenle ilk politika adımı, yeni bir büyük tesis kurmak veya belirli bir teknolojiye geniş bütçe ayırmak yerine ulusal kapasiteyi doğrulanabilir verilerle belirlemek olmalıdır. Laboratuvarların, cihazların, araştırmacıların, şirketlerin ve uluslararası bağlantıların ortak bir envanterde toplanması, programın teknoloji önceliklerini ve yatırım kararlarını daha sağlam bir zemine oturtacaktır.

Yönetişim modeli de aşamalı kurulmalıdır. Daha uygulanabilir olan strateji, başlangıçta büyük ve bağımsız bir kurum oluşturmak değil mevcut bir araştırma kurumu bünyesinde küçük ve teknik kapasitesi yüksek bir Ulusal Füzyon Programı Koordinasyon Birimi ortaya çıkarmaktır. Programın stratejik yönlendirmesi ve kurumlar arası eş güdümü, ilgili kamu kurumlarının mevcut yetki ve sorumlulukları çerçevesinde sağlanmalı; bilimsel ve teknik değerlendirmeler ise bağımsız Bilim ve Teknoloji Danışma Kurulu ile ihtiyaç hâlinde oluşturulacak geçici teknik paneller tarafından yürütülmelidir. Bunun sonucunda stratejik karar alma, program koordinasyonu ve bilimsel değerlendirme sorumlulukları açık biçimde ayrıştırılabilir.

Füzyon programı sabit bir santral takvimine bağlanmamalıdır. 2027-2035 döneminde kapasite envanteri, insan kaynağı, araştırma altyapısı, prototip geliştirme ve uluslararası tedarikçilik aşamalarına odaklanılması daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır. Büyük ölçekli pilot proje veya reaktör yatırımı ancak teknolojik olgunluk, maliyet, yakıt çevrimi, düzenleyici çerçeve ve ulusal katkı imkânı hakkında yeterli kanıt ortaya çıktığında değerlendirilmelidir. Bu kararın 2035 sonrasına bırakılması, pasif bir bekleme anlamına gelmemekte; yatırım kararını verebilecek bilimsel ve endüstriyel kapasitenin bugünden kurulmasını gerektirmektedir.

Türkiye'nin füzyon alanındaki hedefi, kısa vadede başka ülkelerle reaktör takvimi yarışına girmek olmamalıdır. Daha kalıcı hedef; bilimsel gelişmeleri bağımsız biçimde değerlendirebilen, kritik teknolojiler üretebilen ve uluslararası projelere nitelikli katkı sunabilen bir ekosistem kurmaktır. Bu minvalde bir kapasite, ticari füzyonun erken gerçekleşmesi hâlinde Türkiye'nin teşekkül eden pazara hazırlanmasını, takvimin uzaması hâlinde ise yapılan yatırımların diğer stratejik sektörlerde değer üretmesini sağlayacaktır.

Türkiye'nin başarısı, belirli bir tarihte ulusal reaktör kurma hedefiyle ölçülmemelidir. Asıl başarı ölçütü, 2035'e gelindiğinde hangi teknolojilere yatırım yapacağını kendi bilimsel ve endüstriyel kapasitesiyle değerlendirebilmesinin yanı sıra uluslararası füzyon ekosistemine hangi alanlarda katkı sağlayacağının açık biçimde gösterilmesidir.

Füzyon alanında bugünden geliştirilecek bilimsel, teknolojik ve endüstriyel yetkinlikler; Türkiye'nin gelecekteki enerji seçeneklerini çeşitlendirme imkânını güçlendirecektir. Bunun yanında Türkiye'nin uluslararası teknoloji ekosistemindeki konumunu ve stratejik hareket alanını da pekiştirecektir. Bu bakımdan füzyona yönelik uzun vadeli yatırımların başarısı, gelecekte üretilecek elektrik miktarı kadar Türkiye'nin hangi kritik teknolojilerde söz sahibi olabildiği ve bu birikimi diğer stratejik sektörlere ne ölçüde aktarabildiği üzerinden değerlendirilmelidir.

KAVRAMSAL SÖZLÜK

KAVRAMSAL SÖZLÜK

Bilimsel Ateşleme: Füzyon reaksiyonlarında açığa çıkan enerjinin yakıtı daha fazla ısıtarak reaksiyonların sürmesine veya güçlenmesine katkı sağladığı fiziksel koşul. Lazer füzyonunda ateşleme başarısı, tesisin toplam enerji bilançosunun pozitif olduğu anlamına gelmez.

DEMO: Füzyon elektriğinin santral ölçeğinde gösterilmesini amaçlayan demonstrasyon tesisi kavramı. Tek bir evrensel DEMO tasarımı bulunmamakta; farklı programlar farklı mimariler geliştirmektedir.

Divertör: Manyetik hapsetme reaktörlerinde plazmadan çıkan parçacıkların ve ısı yükünün kontrollü biçimde uzaklaştırılmasını sağlayan bileşen. Yüksek ısı akısına ve malzeme aşınmasına dayanması, uzun süreli reaktör işletiminin önemli mühendislik gereksinimlerindendir.

D-T: Döteryum-trityum füzyon yakıt çevrimi. Günümüzde enerji üretimine yönelik füzyon çalışmalarının önemli bölümü bu reaksiyona odaklanmaktadır.

Eylemsiz Hapsetme: Füzyon yakıtının lazerler veya diğer yüksek güçlü sürücülerle çok kısa sürede sıkıştırılarak yüksek sıcaklık ve yoğunluğa ulaştırıldığı yöntem. Yakıt, kendi ataleti sayesinde kısa bir süre boyunca bir arada kalarak füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmesine imkân verir.

Hedef Kazancı: Eylemsiz hapsetme füzyonunda yakıt kapsülünden elde edilen füzyon enerjisinin kapsüle aktarılan lazer veya diğer sürücü enerjisine oranı. Hedef kazancının birin üzerinde olması, bütün tesisin net enerji veya elektrik ürettiğini göstermez.

ITER: Reaktör ölçeğinde yanan plazma ve ilgili teknolojileri göstermek üzere yürütülen çok taraflı uluslararası araştırma projesi.

Kriyojenik Sistem: Çok düşük sıcaklıkların oluşturulmasını ve korunmasını sağlayan soğutma ve yalıtım teknolojileri. Füzyon reaktörlerinde özellikle süper iletken mıknatısların çalışması için gereklidir.

Malzeme Nitelendirme: Bir malzemenin belirli çalışma koşullarındaki mekanik, termal, kimyasal ve radyasyon dayanımının deneysel yöntemlerle değerlendirilmesi. Füzyon uygulamalarında yüksek nötron akısı ve ısı yükü altında güvenilir kullanım açısından önemlidir.

Manyetik Hapsetme: Çok yüksek sıcaklıktaki plazmanın güçlü manyetik alanlar aracılığıyla reaktör duvarlarıyla doğrudan temas etmeden belirli bir hacimde tutulmasını amaçlayan füzyon yöntemi. Tokamak ve stellaratör sistemleri bu yaklaşımın başlıca örnekleridir.

Manyeto-Eylemsiz Füzyon: Manyetik hapsetme ile eylemsiz sıkıştırma yöntemlerinin belirli özelliklerini bir araya getiren hibrit füzyon yaklaşımı. Manyetik alanlarla enerji kayıplarını azaltırken hızlı sıkıştırmayla yüksek yakıt yoğunluğuna ulaşmayı amaçlar.

Nötron Hasarı: Yüksek enerjili nötronların malzemelerin atomik yapısında oluşturduğu değişimler sonucunda mekanik ve fiziksel özelliklerin bozulması. Füzyon reaktörlerinde bileşen ömrünü, bakım ihtiyacını ve malzeme seçimini doğrudan etkiler.

Nükleer Fisyon: Ağır atom çekirdeklerinin daha küçük çekirdeklere bölünmesi sırasında enerji açığa çıkmasını sağlayan nükleer reaksiyon. Günümüzde ticari nükleer elektrik üretiminin temelini oluşturmaktadır.

Nükleer Füzyon: Hafif atom çekirdeklerinin uygun sıcaklık ve yoğunluk koşullarında birleşerek daha ağır çekirdekler oluşturması ve bu süreçte enerji açığa çıkarması. Güneş ve yıldızların enerji üretim mekanizmasının temelini oluşturur.

Örtü (blanket): Döteryum-trityum temelli bir füzyon santralinde nötron enerjisinin ısıya dönüştürülmesi, radyasyon zırhlaması ve çoğu tasarımda trityum üretimi gibi görevler üstlenen reaktör çevreleme sistemi.

Plazma: Maddenin, atomların kısmen veya büyük ölçüde iyonlaşması sonucunda serbest elektronlar ve yüklü parçacıklar içeren hâli. Manyetik hapsetme füzyonunda yakıt, çok yüksek sıcaklıklardaki plazma biçiminde tutulur.

Q (plazma kazancı): Füzyon gücünün plazmaya dışarıdan verilen ısıtma gücüne oranı. Q değeri, tesisin bütün elektrik tüketimini kapsayan net elektrik kazancıyla aynı değildir.

Stellaratör: Plazmanın karmaşık üç boyutlu manyetik alanlar aracılığıyla hapsedildiği füzyon reaktörü tasarımı. Manyetik alanın büyük ölçüde dış mıknatıslarla oluşturulması, sürekli işletme açısından avantaj sağlayabilir.

STEP: Birleşik Krallık'ın Spherical Tokamak for Energy Production programı; füzyon pilot tesisini araştırma, beceri ve sanayi politikasıyla birlikte geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Tokamak: Yüksek sıcaklıktaki plazmanın halka biçimindeki bir vakum kabında, toroidal ve poloidal manyetik alanların birleşimiyle hapsedildiği füzyon reaktörü tasarımı. Manyetik hapsetme alanında en geniş deneysel bilgi birikimine sahip yaklaşımdır.

Trityum Çevrimi: Döteryum-trityum füzyon sistemlerinde trityumun üretilmesi, ayrıştırılması, depolanması, plazmaya beslenmesi ve geri kazanılmasını kapsayan yakıt yönetimi süreci. Ticari santrallerin kendi yakıt ihtiyacını sürdürülebilir biçimde karşılayabilmesi açısından kritik önemdedir.

Yanan Plazma: Füzyon reaksiyonlarından doğan yüklü parçacıkların plazmayı ısıtmasının, dışarıdan sağlanan ısıtmaya kıyasla baskın hâle geldiği plazma rejimi. Ticari füzyona yönelik önemli bilimsel eşiklerden biridir.

Yüksek Alanlı Mıknatıslar: Güçlü manyetik alanlar oluşturmak amacıyla geliştirilen mıknatıs sistemleri. Füzyon reaktörlerinde plazmanın hapsedilmesini sağlar ve özellikle kompakt reaktör tasarımlarında önem taşır.

Yüksek Sıcaklık Süper İletkenleri: Geleneksel süper iletkenlere kıyasla daha yüksek ancak çoğunlukla yine kriyojenik sıcaklıklarda çok düşük elektrik direnciyle çalışabilen malzemeler. Füzyon sistemlerinde daha güçlü manyetik alanlar ve kompakt mıknatıs tasarımları geliştirilmesine imkân sağlayabilir.

KAYNAKÇA

RA -
POR

KAYNAKÇA

1 ITER Hakkında, Erişim Adresi: https://www.iter.org/few-lines [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

2 Experimental Advanced Superconducting Tokamak, Erişim Adresi: https://english.cas.cn/research/platforms/large-research-infrastructures/energy/east/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

3 KSTAR Hakkında, Erişim Adresi: https://www.kfe.re.kr/menu.es?mid=a20202030100 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

4 JT-60SA nedir? Erişim Adresi: https://www.jt60sa.org/wp/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

5 National Ignition Facility nedir? Erişim Adresi: https://lasers.llnl.gov/about/what-is-nif [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

6 International Atomic Energy Agency, "Fundamentals of Magnetic Fusion Technology", IAEA, Vienna (2023), Erişim Adresi: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1945_web.pdf [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

7 International Atomic Energy Agency, "Magnetic Confinement Fusion & Inertial Confinement Fusion" (2025), Erişim Adresi: https://nucleus.iaea.org/sites/connect/FUSEpublic/SitePages/MCF-%26-ICF.aspx [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

8 Max Planck Institute, "Stellarator", Erişim Adresi: https://www.ipp.mpg.de/14779/stellarator [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

9 ITER, "New baseline to prioritize robust start to exploitation" (2024), Erişim Adresi: https://www.iter.org/node/20687/new-baseline-prioritize-robust-start-exploitation [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

10 CHEN Na, "Chinese 'Artificial Sun' Sets New Record in Milestone Step Toward Fusion Power Generation" (2025), Erişim Adresi: https://english.cas.cn/research/platforms/large-research-infrastructures/energy/east/202501/t20250121_1130671.shtml [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

11 Commonwealth Fusion Systems, "SPARC: Proving commercial fusion energy is possible", Erişim Adresi: https://www.cfs.energy/technology/sparc/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

12 International Atomic Energy Agency, "Fusion Energy", IAEA, Vienna (2021), Erişim Adresi: https://www.iaea.org/sites/default/files/fusionenergy.pdf [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

13 2025 Annual Report, National Ignition Facility, Erişim Adresi: https://annual.llnl.gov/fy-2025/national-ignition-facility-2025 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

14 National Nuclear Security Administration: Improvements Needed for Managing Recapitalization of Fusion Facilities, (2025), Erişim Adresi: https://files.gao.gov/reports/GAO-25-107204/index.html [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

15 International Atomic Energy Agency, "Fusion Device Information System (FusDIS)", Erişim Adresi: https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

16 NASA Detects Lattice Confinement Fusion, Erişim Adresi: https://www.nasa.gov/glenn/glenn-expertise-space-exploration/lattice-confinement-fusion/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

17 Kuo-Yi Chen vd., "Electrochemical loading enhances deuterium fusion rates in a metal target" Nature, 644, 640-645 (2025), Erişim Adresi: https://doi.org/10.1038/s41586-025-09042-7 [Erişim Tarihi: 02.10.2026]; Micah E. Karahadian vd., "Enhanced nuclear fusion in the sub-keV energy regime" Nature

Communications, 17, 8845 (2026), Erişim Adresi: https://doi.org/10.1038/s41467-026-74421-1 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

18 Fusion Industry Association (FIA), "Fusion Industry Attracts Record Annual Funding of $4.48bn, Raising Total to $14.24bn" (2026), Erişim Adresi: https://www.fusionindustryassociation.org/fusion-industry-attracts-record-annual-funding-of-4-48bn-raising-total-to-14-24bn/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

19 U.S. Department of Energy, "Fusion Energy Strategy 2024", Erişim Adresi: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

20 U.S. Department of Energy, "Fusion Science and Technology Roadmap" (2026), Erişim Adresi: https://www.energy.gov/documents/fusion-science-and-technology-roadmap [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

21 U.S. Department of Energy, "Energy Department Announces $134 Million to Advance U.S. Fusion Leadership Through Targeted Research" (2025), Erişim Adresi: https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-134-million-advance-us-fusion-leadership-through-targeted [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

22 U.S. Department of Energy, "Office of Fusion", Erişim Adresi: https://www.energy.gov/fusion/office-fusion [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

23 UK Department for Energy Security & Net Zero, "UK fusion strategy 2026", Erişim Adresi: https://www.gov.uk/government/publications/uk-fusion-strategy-2026 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

24 Chinese Academy of Sciences, Institute of Plasma Physics, CRAFT, Erişim Adresi: https://english.ipp.cas.cn/Research/CRAFT/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

25 Tao Wei ve Miao Zijian, "Mading to China | Hefei, Anhui Province: 50 years of relay, chasing the light of 'fusion'" (2026), Erişim Adresi: https://ah.people.com.cn/n2/2026/0721/c227131-41645554.html [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

26 Zhao Yang vd., "Design, commissioning, and first operation of the high-temperature superconducting tokamak Honghuang70," Fusion Engineering and Design, 220, 115341 (2025), Erişim Adresi: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037962500537X [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

27 UK Atomic Energy Authority, "UK Atomic Energy Authority strategy 2026 to 2030", Erişim Adresi: https://www.gov.uk/government/publications/ukaea-strategy/uk-atomic-energy-authority-strategy-2026-to-2030 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

28 Bundesregierung / Bundesbericht Forschung und Innovation, Erişim Adresi: https://www.bundesbericht-forschung-innovation.de/bundesbericht-2026/1-forschungs-und-innovationspolitische-leitlinien-der-bundesregierung/#1-1-mit-der-hightech-agenda-deutschland-zu-mehr-technologischer-leistungsfahigkeit-und-innovationskraft [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

29 Cabinet Office, Government of Japan, "Fusion Energy Innovation Strategy", Erişim Adresi: https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

30 Kyoto Fusioneering, "Turning Fusion Science into Practical Engineering", Erişim Adresi: https://kyotofusioneering.com/en/technology [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

31 Junichi Miyazawa, "Helical Fusion's Current Development Status and Future Plans", Erişim Adresi: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/60/5/60_199/_article/-char/en [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[32] EX-Fusion, Erişim Adresi: https://en.ex-fusion.com/company [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[33] Fusion Industry Association, "Japan Selects Four Industry-Led Projects to Support Fusion Power Demonstration in the 2030s", Erişim Adresi: https://www.fusionindustryassociation.org/japan-selects-four-industry-led-projects-to-support-fusion-power-demonstration-in-the-2030s/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[34] Ministry of Science and ICT, "Establishment of 'Strategy to Accelerate Nuclear Fusion Energy Realization' to Secure Energy Sovereignty in the Era of Carbon Neutrality", Erişim Adresi: https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?bbsSeqNo=42&mId=4&mPid=2&nttSeqNo=1028 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[35] The EUROfusion programme, Erişim Adresi: https://euro-fusion.org/programme/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[36] EUROfusion, "The Fusion Science programme", Erişim Adresi: https://euro-fusion.org/programme/fusion-science/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[37] Fusion for Energy, "The ITER Device", Erişim Adresi: https://fusionforenergy.europa.eu/the-device/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[38] European Commission, "Annual Management and Performance Report for the EU Budget - 2025 financial year" (2026), Erişim Adresi: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52026DC0824 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[39] Commonwealth Fusion Systems, "Commonwealth Fusion Systems Raises Another $1 Billion, Bringing Total Capital Raised to $4 Billion" (2026), Erişim Adresi: https://www.cfs.energy/news-and-media/commonwealth-fusion-systems-raises-another-1-billion-bringing-total-capital-raised-to-4-billion/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[40] Commonwealth Fusion Systems, "Progress on SPARC" (2026), Erişim Adresi: https://www.cfs.energy/devens-campus/updates/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[41] Helion Energy, "Helion Raises $465 Million Series G Funding Round to Meet Surging Global Demand for Power" (2026), Erişim Adresi: https://www.helionenergy.com/newsroom/helion-raises-465-million-series-g-funding-round-to-meet-surging-global-demand-for-power [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[42] TAE Technologies, "TAE Technologies raises $150 million in latest funding round" (2025), Erişim Adresi: https://tae.com/tae-technologies-raises-150-million-in-latest-funding-round/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[43] Proxima Fusion, "Proxima Fusion Extends Series A to €200M Total Funding As It Accelerates Into Hardware Execution" (2025), Erişim Adresi: https://www.proximafusion.com/press-news/proxima-fusion-extends-series-a-to-200m-total-funding-as-it-accelerates-into-hardware-execution [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[44] Thea Energy, "Thea Energy Raises $100 Million Series B Funding to Build Scalable Fusion Power Plants" (2026), Erişim Adresi: https://thea.energy/press-release/thea-energy-raises-100-million-series-b-funding-to-build-scalable-fusion-power-plants/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[45] Pacific Fusion, "Pacific Fusion breaks ground on first-of-a-kind fusion facility in New Mexico" (2026), Erişim Adresi: https://www.pacificfusion.com/resources/pacific-fusion-breaks-ground-on-first-of-a-kind-fusion-facility-in-new-mexico [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[46] Commonwealth Fusion Systems, "Google and Commonwealth Fusion Systems Sign Strategic Partnership" (2025), Erişim Adresi: https://www.cfs.energy/news-and-media/google-and-commonwealth-fusion-systems-sign-strategic-partnership/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[47] Helion Energy, "The world's first fusion power plant", Erişim Adresi: https://www.helionenergy.com/orion [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[48] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Petrol Üretimi Yüzde 26, Doğal Gaz Üretimi Yüzde 39 Arttı", Erişim Adresi: https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=31700 [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[49] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, "Katılım Öncesi Ekonomik Reform Programı (2026-2028)", Erişim Adresi: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2026/01/Katilim-Oncesi-Ekonomik-Reform-Programi-2026_2028.pdf [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

[50] TÜBİTAK TBAE, "TÜBİTAK-2218 Yurt İçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı Çağrısı Duyurusu" (2026), Erişim Adresi: https://tbae.tubitak.gov.tr/tubitak-2218-yurt-ici-doktora-sonrasi-arastirma-burs-programi-cagrisi-duyurusu/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026]; TÜBİTAK TBAE, "Fall School: Fusion Reactions at Low Energies 2024", Erişim Adresi: https://tbae.tubitak.gov.tr/fall-school-fusion-reactions-at-low-energies-2024-tr/ [Erişim Tarihi: 02.10.2026].

NOTLAR

RA-
POR

FÜZYON ENERJİSİ VE TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI

KASIM 2026