

Hızlandırıcı Sürümlü Kritik Altı Nükleer Reaktörler /Accelerator Driven Systems (ADS)/

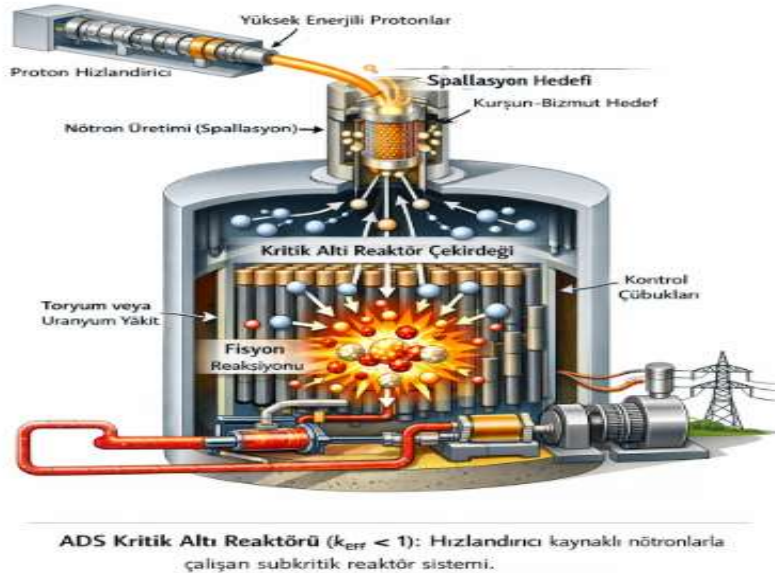
Küresel Durum, Güç Ölçekleri ve Ekonomik Değerlendirme (2026)

Not: Bu yazımız ilgili kaynaklardan YZ destekli olarak hazırlanmıştır /I/ (*)
Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi Almanya ybatakan4@gmail.com 20.02.2026

ÖZET

Bu yazımız, Hızlandırıcı Sürümlü Kritik Altı Nükleer Reaktörler (Accelerator Driven Systems – ADS) teknolojisinin fiziksel temellerini, küresel gelişim düzeyini, güç ölçeklerini, ekonomik parametrelerini ve Türkiye özelinde enerji üretim potansiyelini 2026 verileri ışığında akademik bir çerçevede değerlendirmektedir. Ayrıca TAC projesi bağlamında teknik riskler, fırsatlar ve uzun vadeli stratejik öncelikler incelenmektedir.

ADS konseptinin modern kuramsal çerçevesi, **İtalyan fizikçi Carlo Rubbia** tarafından 1990'lı yıllarda ortaya konulan “Energy Amplifier” yaklaşımıyla sistematik bir yapı kazanmıştır. Bu model, özellikle toryum yakıt çevrimine dayalı, uzun ömürlü radyoaktif atık üretimini azaltmayı hedefleyen ve güvenlik özellikleri güçlendirilmiş bir sistem tasarımını öngörmektedir.



ADS sistemleri, zincirleme fisyon (atom çekirdeği bölünmesi) reaksiyonunun kendi kendini sürdüremediği subkritik (kritik altı) reaktörlerdir. Reaktör çekirdeği, yüksek enerjili proton hızlandırıcısından elde edilen spallasyon nötronları ile beslenir. Proton demeti kesildiğinde nötron

üretimi durur ve fisyon reaksiyonu kısa sürede sona erer. Bu özellik, klasik kritik reaktörlere göre ek bir güvenliliktir.

ADS teknolojisinin temel motivasyonları şunlardır:

- Nükleer güvenliğin artırılması
- Uzun ömürlü radyoaktif atıkların transmutasyonu
- Toryum yakıt çevriminin geliştirilmesi

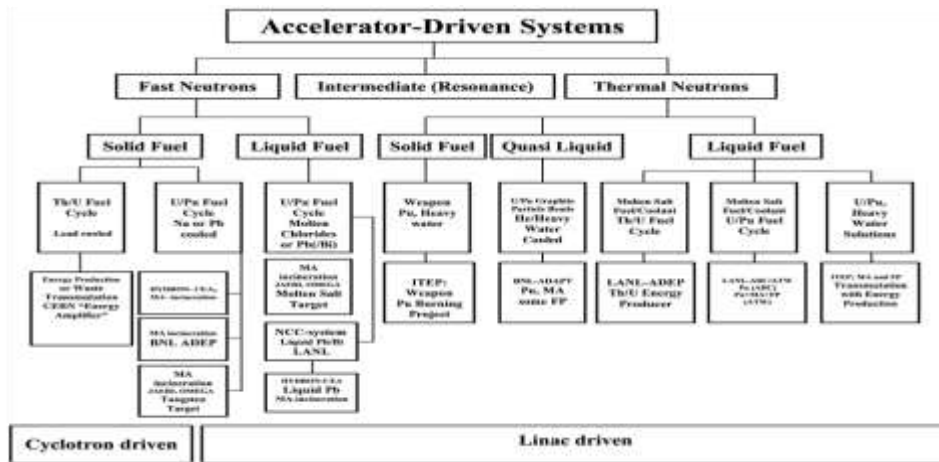
2026 verilerine göre dünyada ticari ölçekte elektrik üreten bir ADS santrali bulunmuyor. Bugünkü projeler araştırma, demonstrasyon veya kavramsal tasarım aşamasındadır. 1000 MW sınıfı ticari bir ADS santralinin yatırım maliyetinin 8–12 milyar ABD doları aralığında olabileceği öngörülmektedir.

Türkiye açısından ADS teknolojisi; toryum rezervlerinin değerlendirilmesi, ulusal hızlandırıcı altyapısının geliştirilmesi ve ileri nükleer Ar-Ge kapasitesinin artırılması bakımından stratejik önem taşımaktadır.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji kullanımının sürekli artışı, fosil yakıtlara olan bağımlılığın sürmesi ve buna bağlı olarak küresel ısınma ile iklim değişikliğiyle mücadele gerekliliği, güvenli ve sürdürülebilir nükleer enerji teknolojilerine yönelik ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda klasik kritik nükleer reaktör tasarımlarına alternatif olarak geliştirilen Accelerator Driven Systems (ADS) – Türkçe adıyla Hızlandırıcı Sürümlü Kritik Altı Nükleer Reaktörler – nükleer güvenlik, yakıt verimliliği ve radyoaktif atık yönetimi açısından önemli bir araştırma ve ilgi alanı haline gelmiştir.

ADS tasarımı, yüksek enerjili bir proton hızlandırıcısından elde edilen nötronların subkritik (kritik altı) bir reaktör çekirdeğini beslemesi esasına dayanır. Bu sistemde zincirleme fisyon reaksiyonu kendi kendini sürdürmez. Reaktör yalnızca dışarıdan sağlanan nötron akışı ile çalışır; proton hızlandırıcısı durdurulduğunda nötron üretimi kesilir ve fisyon reaksiyonu kısa sürede sona erer. Bu durum ADS sistemlerine klasik kritik reaktörlere kıyasla yapısal bir güvenlik avantajı kazandırmaktadır.



Türkiye’de ADS ve toryum temelli nükleer enerji vizyonunun akademik düzeyde gündeme taşınmasında **Prof. Dr. Engin Arık** önemli rol oynamıştır. Arık, Türkiye’nin sahip olduğu

toryum rezervlerinin stratejik önemine dikkat çekmiş ve bu rezervlerin hızlandırıcı destekli sistemler aracılığıyla değerlendirilmesini savunmuştur. **Ne yazık ki bu değerli bilim kadını** İsparta’da meydana gelen bir uçak kazasında değerli meslektaşlarıyla birlikte yitirdik.

Spallasyon Reaksiyonu

ADS sistemlerinin çalışmasının temelinde spallasyon (saçılım /parçalanma) reaksiyonu yer alır.

Spallasyon, yüksek enerjili (genellikle 600 MeV – 1 GeV aralığında) bir protonun ağır bir hedef çekirdeğe (kurşun, bizmut, tungsten gibi) çarpması sonucu çekirdeğin çok sayıda nötron ve hafif parçacık yayarak parçalanması sürecidir.

Fiziksel Süreç

- Proton hızlandırıcıda çok yüksek kinetik enerjiye çıkarılır.
- Proton ağır metal hedefe çarpar.
- Çekirdek şiddetli bir uyarılma yaşar.
- Çarpma başına genellikle 20–30 nötron salınır.
- Bu nötronlar subkritik reaktör çekirdeğinde fisyonu başlatır.

Neden Önemlidir?

- Yüksek nötron verimi sağlar.
- Kritik güvenlik riskini azaltır.
- Uzun ömürlü radyoaktif atıkların transmutasyonuna (başka daha az yarılanma süreli atom çekirdeklerine dönüşümüne) olanak tanır.
- Toryum gibi alternatif yakıt çevrimlerini olası kılar.

Spallasyon nötronları, kritik altı reaktörün dış nötron kaynağıdır. Reaktör kendi başına kritik olmadığından zincirleme reaksiyon yalnızca dış nötron akışı sürdüğü sürece devam eder. Proton demeti kesildiğinde sistem alt kritik duruma geçer ve reaksiyon sona erer. Bu durum önemli bir yapısal güvenlik avantajı sağlar.

2. TEKNİK TEMEL

ADS sistemlerinin ortaya çıkışları üç ana başlıkta toplanabilir:

1. **Nükleer güvenliğin artırılması:** Sub-kritik çalışma prensibi sayesinde reaktivite kazaları ve zincirleme reaksiyon kontrol dışı artışı riskleri minimize edilir.
2. **Uzun ömürlü radyoaktif atıkların transmutasyonu:** Özellikle minör aktinitler ve uzun yarı ömürlü fisyon ürünleri, yoğun nötron akışı sayesinde daha kısa yarılanma süreli izotoplara dönüştürülebilir.
3. **Toryum yakıt çevriminin geliştirilmesi:** **Toryum-232’nin nötron yakalaması yoluyla U-233’e dönüşmesi, sürdürülebilir ve yerli yakıt alternatifleri oluşturur.**

Teknik olarak ADS sistemleri üç temel bileşenden oluşur:

(i) Sürekli dalga (CW) modda çalışan yüksek güçlü proton lineer hızlandırıcı (tipik olarak 600 MeV – 2 GeV enerji aralığında),

- (ii) Ağır metal spallasyon hedefi (genellikle kurşun veya kurşun-bizmut),
- (iii) Sub-kritik reaktör çekirdeği (blanket).

Protonların ağır kurşun çekirdekleri gibi hedeflere çarpması sonucu ortaya çıkan gelen spallasyon reaksiyonları, çekirdekte fisyonu sürdürecektir yoğunlukta nötron üretir. Elde edilen ısı, klasik Rankine çevrimi veya modern buhar türbini sistemleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Sistem verimliliği ve ekonomik fizibilite, hızlandırıcının elektrik tüketimi ve linak verimliliği ile doğrudan ilişkilidir; bu nedenle proton linaklarının yüksek güvenilirlikte ve sürekli işletim kapasitesinde çalışması ADS için kritik bir parametredir.

3. KÜRESEL DURUM (2026)

2026 verileriyle dünyada ticari ölçekte elektrik üreten bir ADS santrali bulunmamaktadır. Bugünkü projeler araştırma, demonstrasyon veya kavramsal tasarım aşamasındadır.

Bugünkü ve Planlanan ADS Projeleri — Güç Ölçekleri ve Tahmini Maliyetler

Ülke	Proje	Güç (MWt/MWe)	Amaç	Durum (2026)	Maliyet (\$)	Elektrik Başlangıcı
Belçika	MYRRHA	57 / —	Araştırma- Transmutasyon	İnşaat (fazlı)	1.6–2.0 mld.	Elektrik üretimi yok
Çin	CIADS	200–500 / 100– 250	Pilot Enerji + ADS Demo	Pilot aşama	3–6 mld.	2035–2038 (pilot)
Japonya	JAEA ADS	<100 / —	Transmutasyon Ar-Ge	Araştırma	1–2 mld.	Plan yok
ABD	DOE / ATW	— / —	Temel araştırma, transmutasyon	Ar-Ge	1–3 mld.	Plan yok
AB/Fransa	MYRRHA + CEA	— / —	Araştırma, transmutasyon	Öncelik azaldı	—	Plan yok
Almanya	GSI/FAIR, KIT	— / —	Temel fizik, ADS güvenlik Ar-Ge	Araştırma	—	Plan yok

4. AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ (ABD) — ADS POLİTİKA VE ARAŞTIRMALARI

4.1 Tarihsel Arka Plan ve ATW Programı

ABD'nin ADS teknolojisine ilgisi 1990'lı yıllara dayanmaktadır. 1999 yılında Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından başlatılan Accelerator Transmutation of Waste (ATW) programı, ülkedeki uzun

ömürlü nükleer atıkların ADS teknolojisiyle transmutasyonunu hedeflemiştir. Argonne Ulusal Laboratuvarı, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı bu program kapsamında kritik araştırmalar yürütmüştür.

ATW programının temel hedefi, özellikle Yucca Mountain nükleer atık deposunun kapasitesini zorlayan uzun ömürlü transüranik elementlerin (plütonyum, neptünyum, amerisyum, kürüm) spallasyon nötronları aracılığıyla daha kısa yarılanma ömürlü izotoplara dönüştürülmesiydi.

4.2 Kurumsal Yapı ve Araştırma Merkezleri

- Argonne Ulusal Laboratuvarı (ANL): ATW reaktör fiziği tasarımı; nötronik hesaplamalar; kurşun-bizmut soğutucu teknolojileri. Dr. Yousry Gohar liderliğinde kritik fizibilite çalışmaları yürütülmüştür.
- Los Alamos Ulusal Laboratuvarı (LANL): Yüksek güçlü proton hızlandırıcısı (PSR - Proton Storage Ring) altyapısı; spallasyon nötron kaynağı araştırmaları.
- Brookhaven Ulusal Laboratuvarı (BNL): Spallasyon Nötron Kaynağı (SNS) teknolojileri; hızlandırıcı tabanlı nötron üretimi konusunda dünya liderliği.
- Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORNL): Spallasyon Nötron Kaynağı (SNS) işletimi; nötron bilimi ve malzeme araştırmaları.
- Idaho Ulusal Laboratuvarı (INL): İleri nükleer yakıt döngüsü araştırmaları; transmutasyon yakıt malzemeleri.

4.3 DOE Politika Çerçevesi ve Finansman

ABD Enerji Bakanlığı, ADS teknolojisini Office of Nuclear Energy bünyesinde değerlendirmektedir. 2000'li yılların başında ATW programına yönelik önemli bütçeler ayrılmış olsa da program daha sonra Yucca Mountain projesiyle ilgili siyasi tartışmalar nedeniyle öncelik kaybetmiştir.

2010'ların ortasından itibaren DOE, atık transmutasyonunu Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) ve ardından Fuel Cycle Technologies (FCT) programları çerçevesinde sürdürmüştür. Bu programlar kapsamında ADS konsepti, kritik reaktör temelli transmutasyon alternatifleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

2023–2026 döneminde DOE'nin ileri nükleer araştırma portföyü esas olarak Küçük Modüler Reaktörler (SMR) ve Gelişmiş Reaktörler üzerine yoğunlaşmıştır; bu durum ADS'ye ayrılan kaynakları kısıtlamıştır.

4.4 Ulusal Hızlandırıcı Altyapısı

ABD, dünya genelinde en gelişmiş proton hızlandırıcı altyapısına sahip ülkeler arasında yer almaktadır:

- Spallation Neutron Source (SNS) — Oak Ridge: 1 GeV proton enerjisi, 1.4 MW demet gücü ile dünyanın en güçlü spallasyon nötron kaynaklarından biridir. Nötron biliminde kullanılmakta olup ADS teknolojisi için kritik altyapı deneyimi sağlamaktadır.
- Fermilab Proton Hızlandırıcısı: Yüksek güçlü proton demeti teknolojisinde öncü; Proton Improvement Plan II (PIP-II) projesiyle kapasite artırımı planlanmaktadır.
- LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center): 800 MeV proton linaksı; spallasyon nötron araştırmaları için kritik altyapı

4.5 Akademik Çevreler ve Öne Çıkan Araştırmacılar

- Dr. Yousry Gohar (ANL): ATW reaktör tasarımı ve transmutasyon sistemi mühendisliği.
- Dr. James Laidler (ANL): Yakıt döngüsü entegrasyonu ve transmutasyon stratejileri.

- Dr. Ehud Greenspan (UC Berkeley): İleri reaktör tasarımı ve ADS yakıt döngüsü optimizasyonu.
- Dr. W. S. Yang (Purdue Univ.): Nötronik tasarım ve transmutasyon hesaplamaları.

4.6 Mevcut Durum ve Kısa Vadeli Beklentiler (2026)

2026 itibarıyla ABD'de özel bir ADS reaktör inşaat projesi bulunmamaktadır. DOE araştırma programları, ağırlıklı olarak:

- Bilgisayar simülasyonu ve reaktör fizik modelleme çalışmalarına,
- Malzeme araştırmalarına (kurşun-bizmut soğutucu uyumlu malzemeler),
- Hızlandırıcı güvenilirliği ve beam trip sıklığı azaltma teknolojilerine

yoğunlaşmaktadır. Özel sektör aktörleri arasında TerraPower, X-energy gibi şirketler ileri nükleer alanda faaliyet göstermekte; ancak bu şirketlerin portföyleri ağırlıklı olarak kritik reaktör teknolojilerini kapsamaktadır.

ABD'nin ADS alanındaki temel katkısı; hızlandırıcı altyapısı, nötronik modelleme kapasitesi ve atık transmutasyonu alanındaki birikimli akademik araştırmalar açısından küresel düzeyde belirleyici olmaya devam etmektedir.

5. AVRUPA BİRLİĞİ (AB) — ADS ARAŞTIRMA PROGRAMLARI VE POLİTİKALARI

5.1 Avrupa'nın ADS Vizyonu

Avrupa Birliği, nükleer atık yönetimini enerji politikasının kritik bir bileşeni olarak ele almakta ve bu çerçevede ADS teknolojisini stratejik bir araştırma önceliği olarak desteklemektedir. AB'nin ADS politikası; transmutasyon teknolojilerinin geliştirilmesi, ortak araştırma altyapısının oluşturulması ve üye devletler arasında nükleer Ar-Ge işbirliğinin güçlendirilmesi ekseninde şekillenmektedir.

Euratom (Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu) çerçevesi, AB'nin nükleer araştırma faaliyetlerinin temel finansman ve koordinasyon mekanizmasını oluşturmaktadır. Euratom kapsamında yürütülen çok sayıda proje ADS teknolojisini doğrudan kapsam altına almıştır.

5.2 Önemli AB Araştırma Projeleri

MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) — Belçika

MYRRHA, Belçika'daki SCK CEN (Studiecentrum voor Kernenergie / Centre d'Étude de l'énergie Nucléaire) bünyesinde geliştirilen ve AB'nin en kapsamlı ADS projesidir. 57 MWt gücünde, kurşun-bizmut soğutmalı, proton hızlandırıcısıyla beslenen bu sistem dünyada inşaat aşamasına geçebilmiş tek ADS tesisidir.

- Konum: Mol, Belçika
- Reaktör Tipi: Kurşun-bizmut soğutmalı, hızlandırıcı sürümlü subkritik reaktör
- Proton Hızlandırıcı: 600 MeV, 4 mA sürekli dalga linaksı
- Bütçe: Yaklaşık 1.6–2.0 milyar Euro
- Proje Direktörü: Prof. Dr. Hervé Ait Abderrahim
- Durum (2026): Fazlı inşaat programı kapsamında linaks bölümünün inşaatı devam etmektedir. İlk nötron üretiminin 2030'ların başında gerçekleşmesi beklenmektedir.

MYRRHA'nın temel hedefleri şunlardır: uzun ömürlü radyoaktif atıkların transmutasyonu, ileri malzeme araştırmaları, tıbbi izotop üretimi ve ADS teknolojisinin demonstrasyonu.

GUINEVERE Projesi

SCK CEN bünyesinde gerçekleştirilen GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead VEnus REactor) projesi, kurşun soğutmalı subkritik bir reaktörde hızlandırıcı sürümlü çalışma prensibini başarıyla doğrulayan önemli bir deneysel adım olmuştur. Bu proje, MYRRHA'nın tasarım doğrulama sürecine kritik katkılar sağlamıştır.

EUROTRANS Programı

Avrupa Transmutasyon Araştırmaları (EUROTRANS) programı; nükleer atıkların transmutasyonu için ADS sistemlerinin teknik fizibilitesini kapsamlı biçimde araştırmıştır. Program, 2005–2010 yılları arasında 12 Avrupa ülkesinden 30'dan fazla kurumun katılımıyla yürütülmüştür.

CDT (Central Design Team) ve XT-ADS Konsepti

EUROTRANS kapsamında geliştirilen XT-ADS (eXperimental Accelerator Driven System) konsepti, MYRRHA projesinin temelini oluşturmuş ve Avrupa'da demonstrasyon ölçekli ilk ADS tesisi için teknik altyapı sağlamıştır.

5.3 AB Finansman Mekanizmaları

- Horizon 2020 ve Horizon Europe: AB çerçeve araştırma programları kapsamında MYRRHA ve ilgili projeler önemli finansman desteği almıştır.
- Euratom Araştırma ve Eğitim Programı: Nükleer güvenlik, atık yönetimi ve transmutasyon teknolojilerine yönelik Euratom bütçe tahsisleri.
- Özel Devlet Finansmanı: Belçika, İspanya ve İtalya başta olmak üzere üye devletlerin ulusal bütçelerinden sağlanan doğrudan katkılar.

5.4 Diğer AB Üyesi Ülkelerin Katkıları

Fransa (CEA)

Fransız Alternatif Enerji ve Atom Enerjisi Komisyonu (CEA), tarihsel olarak ADS araştırmalarında Avrupa'nın en aktif aktörlerinden biri olmuştur. Ancak 2010'ların ortasından itibaren CEA'nın öncelikleri ağırlıklı olarak kritik hızlı reaktör teknolojilerine (ASTRID projesi) kaymıştır. CEA, GUINEVERE gibi deneysel projelere ve MYRRHA'ya teknik katkı sağlamaya devam etmektedir.

- Jean-Pierre Revol (CEA): GUINEVERE ve subkritik sistem güvenliği çalışmaları.
- Kaspar Koch (CEA/SCK CEN): Nötronik tasarım ve transmutasyon hesaplamaları.

İspanya (CIEMAT)

İspanya'dan Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), EUROTRANS ve MYRRHA projelerine aktif katkılar sağlamaktadır. İspanya aynı zamanda Avrupa Spallasyon Kaynağı (ESS — Lund, İsveç) projesine de ortak ülkeler arasındadır.

İtalya (ENEA ve CERN)

Carlo Rubbia'nın entelektüel mirasını taşıyan İtalya, ADS araştırmalarında tarihsel olarak öncü rol üstlenmiştir. ENEA (Ulusal Yeni Teknolojiler, Enerji ve Sürdürülebilir Ekonomik Kalkınma Ajansı) ve INFN (Ulusal Nükleer Fizik Enstitüsü) ADS alanında aktif araştırma merkezleridir.

5.5 Avrupa Spallasyon Kaynağı (ESS) — İsveç

İsveç'in Lund kentinde inşaat aşamasında olan Avrupa Spallasyon Kaynağı (ESS), 2 GeV proton enerjisi ve 5 MW demet gücüyle dünyanın en güçlü nötron kaynağı olma hedefindedir. ESS doğrudan bir ADS sistemi olmamakla birlikte, geliştirilen hızlandırıcı teknolojileri ve operasyonel deneyim, gelecekteki ADS sistemleri için kritik altyapı bilgisi sağlayacaktır.

5.6 AB'nin Konuya Genel Yaklaşımı (2026)

AB, ADS teknolojisini enerji üretiminden ziyade uzun vadeli nükleer atık yönetimi stratejisinin bir bileşeni olarak konumlandırmaktadır. Bu yaklaşım iki temel nedene dayanmaktadır:

- Kısa ve orta vadede ticari ADS elektrik üretiminin ekonomik olarak rekabet gücüne sahip olmaması,
- Transmutasyon kapasitesinin mevcut nükleer atık birikimini azaltmada sağlayacağı uzun vadeli faydaların somut olması.

AB düzeyinde ortak bir 'Avrupa ADS Programı' henüz hayata geçirilmemiş olsa da MYRRHA, fiilen AB'nin referans ADS demonstrasyon tesisi konumundadır..

5.7 Akademik Çevreler ve Öne Çıkan Araştırmacılar

- Dr. Yousry Gohar (ANL): ATW reaktör tasarımı ve transmutasyon sistemi mühendisliği.
- Dr. James Laidler (ANL): Yakıt döngüsü entegrasyonu ve transmutasyon stratejileri.
- Dr. Ehud Greenspan (UC Berkeley): İleri reaktör tasarımı ve ADS yakıt döngüsü optimizasyonu.
- Dr. W. S. Yang (Purdue Univ.): Nötronik tasarım ve transmutasyon hesaplamaları.

5.8 Bugünkü Durum ve Kısa Vadeli Beklentiler (2026)

2026 verilerine göre ABD'de özel bir ADS reaktör inşaat projesi bulunmamaktadır. DOE araştırma programları, ağırlıklı olarak:

- Bilgisayar simülasyonu ve reaktör fizik modelleme çalışmalarına,
- Malzeme araştırmalarına (kurşun-bizmut soğutucu uyumlu malzemeler),
- Hızlandırıcı güvenilirliği ve beam trip sıklığı azaltma teknolojilerine

yoğunlaşmaktadır. Özel sektör aktörleri arasında TerraPower, X-energy gibi şirketler ileri nükleer alanda faaliyet göstermekte; ancak bu şirketlerin portföyleri ağırlıklı olarak kritik reaktör teknolojilerini kapsamaktadır.

ABD'nin ADS alanındaki temel katkısı; hızlandırıcı altyapısı, nötronik modelleme kapasitesi ve atık transmutasyonu alanındaki birikimli akademik araştırmalar açısından küresel düzeyde belirleyici olmaya devam etmektedir.

6. TÜRKİYE’de ADS İLE İLGİLİ DURUM

Türkiye'de Hızlandırıcıya Dayalı Teknolojiler Konusunda Çalışmaları Olan Merkezler (*)

Türkiye'de çalışmalar henüz tasarım ve hızlandırıcı altyapı geliştirme düzeyindedir; tam ölçekli bir ADS reaktör projesi bulunmamaktadır.

Kurum / Üniversite	Proje / Program	Odaklandığı Alan
Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı (TARLA) – Ankara Üniversitesi	Proton ve Elektron Hızlandırıcı Tesisleri	Elektron hızlandırıcısına dayalı ışınlama ve nükleer araştırmaları
TENMAK-NÜKEN	Hızlandırıcıya dayalı Ar-Ge çalışmaları	Hızlandırıcılara dayalı Ar-Ge çalışmaları ve radyoizotop üretimi
Ankara Üniversitesi Fizik ve Fizik Müh. Bölümleri ve Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (THE)	Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi çalışmaları, PALS Araştırma Grubu ve CERN projelerine katılım	Parçacık hızlandırıcıları ve ışınlama kaynakları alanında araştırmalar yürütmek ve Ar-Ge projeleri geliştirmek
İVMER (ODTÜ)	Hızlandırıcı ve uzay teknolojileri; CERN projelerine katılım	Hızlandırıcı ve radyasyon teknolojileri alanında Ar-Ge çalışmaları yapmak
KAHVELAB (Boğaziçi Üniversitesi)	Hızlandırıcı ve dedektör teknolojileri; CERN projelerine katılım	Hızlandırıcı teknolojileri ve uygulamaları alanında Ar-Ge çalışmaları yapmak
ETAŞ Elektronik Teknolojileri A.Ş.	Endüstriyel elektron hızlandırıcısı tasarımı ve üretimi	Elektron hızlandırıcılarının tasarımı, imalatı ve ticarileştirilmesi; ışınlama uygulamaları
TOBB ETÜ – Yenilenebilir Enerji ve Fizik Laboratuvarları (YEF)	Hızlandırıcı teknolojileri ve fizik Ar-Ge çalışmaları	Hızlandırıcı tabanlı araştırmalar ve enerji uygulamaları alanında Ar-Ge

7. TÜM DÜNYA İÇİN GENEL EKONOMİK VE TEKNİK DEĞERLENDİRME

ADS sistemlerinde en büyük maliyet kalemi yüksek güçlü proton hızlandırıcısıdır. **1000 MW** sınıfı ticari bir ADS santrali için toplam yatırım maliyetinin **8–12 milyar ABD doları** aralığında olabileceği öngörülmektedir. Bu değer bugünkü basınçlı su reaktörlerine (PWR) göre daha yüksektir.

Başlıca teknik zorluklar:

- Sürekli ve güvenilir yüksek akımlı hızlandırıcı işletimi
- Beam trip problemleri
- Kurşun-bizmut soğutucularda malzeme korozyonu
- Polonyum oluşumu ve radyasyon güvenliği

Dünyada ADS Alanında Öne Çıkan Araştırmacılar

Araştırmacı	Kurum	Ülke	İlgili Proje / Katkı Alanı
Hervé Ait Abderrahim	SCK CEN	BE Belçika	MYRRHA Direktörlüğü; kurşun-bizmut soğutmalı ADS geliştirme
Carlo Rubbia	(Eski) CERN	İT İtalya	“Energy Amplifier” konsepti; ADS’nin kuramsal temeli
Yousry Gohar	Argonne National Laboratory	US ABD	ATW (Accelerator Transmutation of Waste), reaktör fiziği tasarımı
Francesco Carminati	CERN	CH İsviçre	Rubbia ekibi; erken ADS fizibilite çalışmaları

Araştırmacı	Kurum	Ülke	İlgili Proje / Katkı Alanı
Jean-Pierre Revol	CEA	FR Fransa	GUINEVERE deneysel subkritik sistem çalışmaları
Takashi Kato	Japan Atomic Energy Agency	JP Japonya	ADS transmutasyon sistemi tasarım çalışmaları
Zhang Yan	Chinese Academy of Sciences	CN Çin	China ADS (C-ADS) hızlandırıcı geliştirme

8. Özetle Sonuçlar

Belçika (MYRRHA) → En kurumsallaşmış ve inşa aşamasına geçmiş ADS projesi

Çin (C-ADS) → En büyük ölçekli ulusal yatırım

Japonya ve Fransa → Atık transmutasyonu odaklı sistem tasarımları

ABD → ATW programı ve hızlandırıcı tabanlı transmutasyon araştırmaları

Türkiye → Hızlandırıcı altyapı ve toryum perspektifli kuramsal çalışmalar

2026 verileriyle, ADS teknolojisi araştırma ve demonstrasyon aşamasındadır. Ticari ölçekte elektrik üretimi yapan bir ADS tesisi bulunmamaktadır. **En erken pilot elektrik üretiminin 2035 sonrası gerçekleşmesi, 1 GW ölçekli ticari ADS uygulamalarının ise 2040–2045 sonrası mümkün olması beklenmektedir.**

ADS sistemleri kısa vadede ticari enerji çözümü olmaktan çok, uzun sürede stratejik nükleer teknoloji ve atık azaltma platformu olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye açısından ADS; toryum rezervlerinin değerlendirilmesi, ulusal hızlandırıcı teknolojisinin geliştirilmesi ve yüksek katma değerli nükleer Ar-Ge kapasitesinin artırılması bakımından stratejik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR /I/ 2 YZ

IAEA (2015). *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development*. IAEA-TECDOC-1769.

World Nuclear Association (2026). *Accelerator-Driven Nuclear Energy*.

OECD/NEA Reports on Partitioning and Transmutation (P&T).

MYRRHA Project Technical Design Reports, SCK CEN.

Chinese Academy of Sciences ADS Program Publications.

Sustainability Journal (2024). *Energy Amplifier Systems as Sustainable Nuclear Reactor*

(*) Türkiye ile ilgili Tablo'daki bilgiler iki değerli Prof. arkadaşın nazik katkılarıyla