

Termonükleer Ar-Ge Çalışmaları Kapsamında Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi NASA Tarafından Füzyon Yakıtlı Uzay Araçları Geliştirilmesi

Ahmet Cangüzel Taner

Fizik Yüksek Mühendisi

Fizik Mühendisleri Odası FMO (canguzel.taner@gmail.com)

Nükleer plazma ve nükleer füzyon enerjisi fizikçileri; periyodik tablonun ilk sıralarında yer alan hidrojen ve helyum elementlerinin nükleer birleşmesi - nükleer kaynaşması yoluyla ortaya çıkan aynı zamanda mavi dünyanın varlığını oluşturan dev enerji kaynağı güneş enerjisinin yeryüzünde elde edilmesi için yaklaşık yüz yılı aşkın süredir yoğun termonükleer Araştırma - Geliştirme Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. Elde edilecek suni güneş enerjisi ile birlikte gelecekte doğa dostu temel yük kaynağı karbonsuz yenilikçi nükleer füzyon enerjisi santralleri kompleksleri elektrik üretimleri gerçekleştirilmesi olasılığı da doğmaktadır. Nükleer füzyon kaynaklı yapay güneş enerjisi oluşturulması çalışmaları sürerken küresel nükleer fisyon menşeli karbonsuz baz yüklü nükleer güç santralleri NGS üniteleri kompleksleri işletilmesi de devam etmektedir. Nükleer fisyon enerjisi ilk kez 1938'de Almanya'da keşfedilmiştir. Deneme amaçlı nükleer fisyon reaktörü ise 1942 yılında Amerika Birleşik Devletleri Chicago kentinde kurulmuştur. Dünyada 440 adet global nükleer güç santrali NGS reaktörleri kanalıyla takribi 400 gigawatt'lık karbondioksit emisyonları olmayan elektrik enerjisi üretimleri sağlanmaktadır. Ancak, söz konusu karbonsuz nükleer fisyon reaktörleri ünitelerinin bazı olumsuz yönleri de mevcudiyetini sürdürmektedir. Örneğin, uluslararası radyasyon güvenliği, nükleer güvenlik ve nükleer emniyet kriterleri çerçevesinde tüketilmiş zenginleştirilmiş uranyum yakıtları çubuklarının muhafazası gerekmektedir. Diğer taraftan, karbonsuz nükleer fisyon santralleri çalıştırılması sonucu oluşan uzun yarı ömürlü radyoaktif atıkların binlerce yıl kontrol ve denetim altında tutulması icap etmektedir. Ayrıca, maalesef nadiren de olsa karbonsuz nükleer fisyon enerjisi reaktörleri işletilmesi kaynaklı vuku bulan uluslararası nükleer güvenlik ölçütleri ile radyasyon güvenlik kuralları uygulamaları yetersiz Çernobil nükleer güç santrali NGS ve doğal afetler sonrası beliren Japonya Fukushima nükleer yakıt erimesi kazaları neticesi ise ciddi bölgesel radyoaktif çevre kirlilikleri meydana gelmiştir. Söz konusu nükleer fisyon elektrik kompleksleri işletimi dezavantajları karşısında güneş sistemi içinde yaşamaya elverişli yeğane mavi gezegen dünyanın korunması çerçevesinde hayati öneme sahip ticari nükleer füzyon enerjisi santralleri kurulması seçeneği, vazgeçilmez nitelikleri olan sürdürülebilir doğa dostu karbonsuz baz yüklü alternatif enerji kaynakları arasında kabul edilmektedir. Olumlu gelişen ve ilerleyen nükleer füzyon enerjisi santralleri tasarımları için düzenli manyetik alanlı tokamak tipi termonükleer dizaynlar ve karmaşık manyetik alanlı stellarator dizaynı nükleer plazma düzenekleri rekabeti de ön plana çıkmaktadır. Örneğin, tokamak tasarımı Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor - ITER)'nin 2025 yılında faaliyete geçmesi öngörülmektedir. Uzayın derinliklerinin ve özellikle yaşanabilir yeni gezegenlerin keşfi bağlamında inovatif robot uzay araçları yakıtları için nükleer füzyon enerjisinin kullanımı ve devreye alınmasına yönelik ABD NASA kuruluşu tarafından yürütülen Ar-Ge çalışmaları bu yazıda incelenmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri **ABD Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (National Aeronautics and Space Administration - NASA)**, insanlı uzay araçları ve insansız robot uydular vasıtasıyla başta Ay ve Mars gezegenleri dahil olmak üzere kâinatın keşfi bağlamında uzun uzay yolculuğu programları planlamaktadır. Yaklaşık 60 yıldır fotovoltaik piller ([photovoltaic cells](#) - [solar cell](#)), yakıt hücreleri ([fuel cells](#)) ve radyoizotop termoelektrik jeneratörler ([radioisotope thermoelectric generators](#) - **RTGs**), uzay araçları yakıtları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Radyoizotop termoelektrik jeneratör **RTG** güç üretimi ise plutonyum-238 (Pu-238) radyoizotopunun bozunması ile oluşan ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibi ve ilkesi üzerine dayanmaktadır. Plutonyum-238 (Pu-238) izotopu yarı ömrü 87.7 yıl seviyesinde bulunmaktadır. Pu-238'in uzun olan yarı ömrü nedeniyle oldukça uzunca süre yenilikçi uzay araçları yakıtları kullanımları yönünde bir olanak tanımaktadır. Örneğin, Pu-238 nükleer yakıtlı [Pioneer 10](#), [Pioneer 11](#), [Voyager 1](#) ve [Voyager 2](#) robot uyduları uzaya fırlatılmaları anından itibaren söz konusu radyoaktif yakıt sayesinde yaklaşık 45 yıl boyunca nükleer elektrik enerjisi üretmiştir. Ayrıca, Mars gezegeni keşfi için faaliyete geçen [Mars Science Laboratory](#) ve [Perseverance Rover](#) uzay araçları da Pu-238 radyoaktif yakıtlı nükleer teknolojiler kullanmaktadır.

Aşağıdaki resimde gösterilen ve çok güçlü alfa parçacıkları yayan plutonyum-238 Pu-238 ([plutonium-238](#)) radyoizotopu, kendi sıcaklığı ile parlayan farklı bir özelliğe sahip bulunmaktadır.



Kaynak: [Vikipedi](#) Özgür Ansiklopedi

Öte yandan, inovasyona dayalı modern uzay araçları ise **RTG** teknolojiye radyoaktif jeneratör ünitelerine kıyasla çok daha güçlü elektrik üretimi kompleksleri kaynakları ve sistemlerine gereksinim duymaktadır. Kafes sınırlamalı füzyon ([lattice confinement fusion](#)- **LCF**), metal kafese limitlenmiş nükleer yakıtlı bir nükleer füzyon tipi olarak bilinmektedir. Çok yakınlaşan iki çekirdeğin birbirini itmesi olasılığı ve böylece iletken metalin yüksek elektron yoğunluğunu

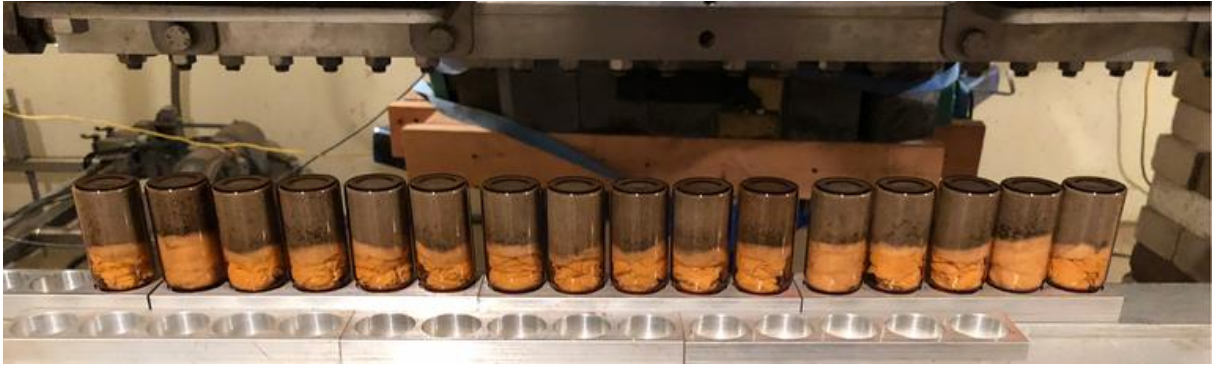
azaltması esasına dayalı sınırlama olayı, pozitif yüklü çekirdeklerin nükleer füzyonuna, bir başka deyimle, nükleer birleşme - nükleer kaynaşma reaksiyonları ve tepkimelerine yol açmaktadır.

Amerika **NASA** teşkilâtı **Ar-Ge** çalışmaları kapsamında 20 Haziran 2018 tarihinde yürütülen bir deneyde döteryumlanmış erbiyum ([erbiyum](#)) (**ErD₃**), aşağıda görüldüğü gibi baş parmak boyutunda ufak şişelere yerleştirilmiştir. Söz konusu materyalleri deneydeki konumunda tutmak için materyallerin üstünde ıslak mendiller bulunmaktadır. Materyallerin kırılması ve parçalanması ise tamamen doyuma ulaşıldığını işaret etmektedir. Atom numarası 68 olan erbiyum, Er sembolü ile gösterilen ve lantanitler grubundan doğada nadir toprak elementleri arasında sayılan katı bir metaldir.



Kaynak: Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (National Aeronautics and Space Administration - NASA)

Küçük şişelere doldurulmuş numunelerin baş aşağı konumda gama ışınları ile ışınlanması sonrası son hali aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonlar türleri sınıfına giren ve yüksek enerjili gama ışınlarına maruz bırakılan örneklerin konulduğu şişelerin açık bal rengi olan kehribar camı durumuna dönüşmesi ise göze çarpmaktadır.

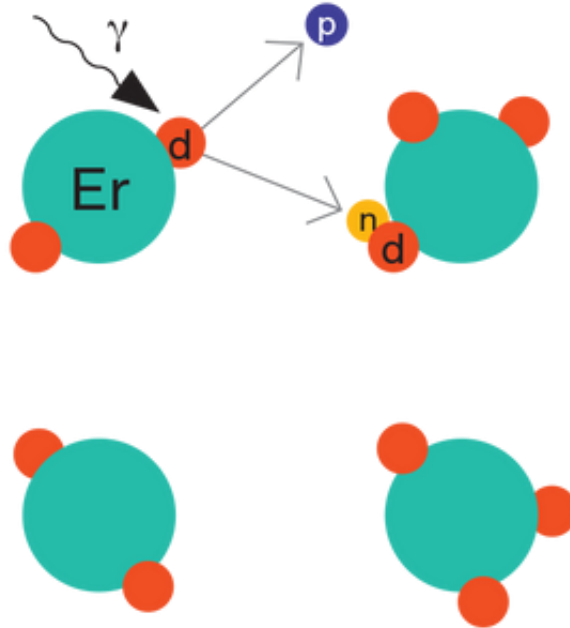


Kaynak: NASA

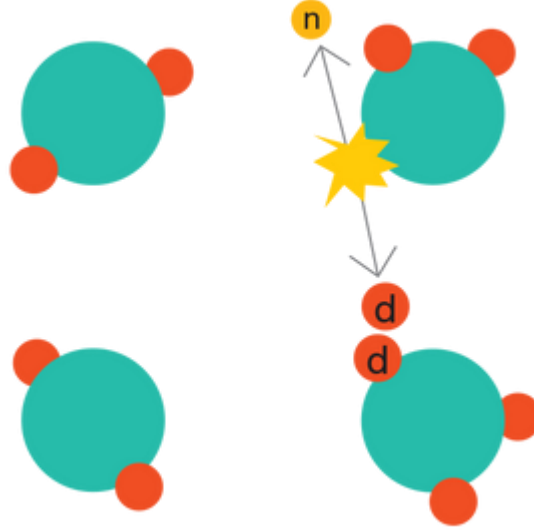
Cleveland kentinde konuşlu **NASA Glenn Araştırma Merkezi (Glenn Research Center - GRC)**'nde görevli bilim insanları ve mühendisler, inovasyona dayalı termonükleer araştırmalar sonuçlarının kızıl gezegen Mars yüzeyinde küçük robot uyduların nükleer füzyon enerjisi güç üretimleri kapsamında kullanılması için yoğun bir mücadele vermektedir. Mevzu bahis çalışmalar ile kafese hapsedilmiş füzyon ([lattice confinement fusion](#)- LCF) yöntemi sayesinde zenginleştirilmiş uranyum gibi radyoaktif kontaminasyon riski ve tehlikesi olan aynı zamanda yüksek iyonlaştırıcı radyasyon yayan pahalı materyallerin uzay araçları yakıtlarından arıtılması hedeflenmektedir. Gelecek yıllarda evrimsel nükleer füzyon enerjisi teknolojisi geliştirilmesi ve ilerlemesi olgunlaştığı takdirde dünyada konutların ve işyerlerinin

karbonsuz güç üretimleri ihtiyaçları ve tüketimlerinin küçük yenilikçi doğa dostu termonükleer donanımlar ve ekipmanlar ile karşılanması imkânı da sağlanacaktır. Böylece, küresel iklim krizi yaratan aynı zamanda global ekolojik dengenin bozulması kaynaklı yoğun fosil yakıtlar tüketimi önlenmesi ve global enerji arz güvenliği sorunlarının aşılması açısından çok önemli bir temiz enerji nükleer füzyon çağı da başlatılacaktır. Diğer taraftan, Fizikçiler uzun yıllardır füzyon enerjisinin çevre dostu karbonsuz nükleer güç teknolojisi olduğunu savunmaktadır. Her şeyden önce mavi dünyanın varlığı olan güneş gezegeni; nükleer füzyon aracılığıyla sürdürülebilir, yeşil, doğa dostu ve çevreci muazzam bir enerji üretmektedir. Öte yandan, çok düzenli güneş ışınları ve güneş radyasyonları yayan güneş, devasa bir büyüklüğe sahip bulunmaktadır. Örneğin, güneşin çapı yaklaşık 1.4 milyon kilometre olup, nükleer plazma çekirdeğindeki sıvı suyun yoğunluğu ise 150 kat daha yüksektir. Güneş çok büyük çekim kuvveti ile dev 15 milyon °C derece santigrat düzeyine kadar varan bir sıcaklığa sahiptir. Periyodik cetvelin ilk sıralarında yer alan izotopların nükleer birleşme ve nükleer kaynaşma reaksiyonları yoluyla bir arada tutulması sayesinde sürekli nükleer füzyon tepkimelerinin oluşması da körüklenmektedir. Bir nükleer füzyon reaktörü kompleksinin net pozitif enerji verimini temin edebilmesi için yakıt parçacık yoğunluğu ve sınırlama zamanı ile plazma sıcaklığının kritik bir seviyeye kadar ulaşması gerekmektedir. Söz konusu kritik düzey [John D. Lawson](#) tarafından keşfedilmiş ve **Lawson Kriteri** ([Lawson Criterion](#)) olarak adlandırılmıştır. Ancak, yukarıda kısaca ifade edilen **Lawson Kriteri** ölçütleri ve ilkelerine ise şimdiye kadar maalesef erişilememiştir.

Kafese limitli füzyon ([lattice confinement fusion- LCF](#)) modeli çerçevesinde bir gama ışınları demeti, hazırlanan **erbiyum (Er)** numunesi ya da döteryum ile doymuş (satüre edilmiş) titanyum üzerine doğru aşağıdaki şemada gösterildiği gibi yönlendirilmektedir. Yeterli enerjiye sahip olan iyonlaştırıcı gama ışınları kanalıyla metal kafes içindeki proton ve nötronlar, döteryum atomunu parçalamaktadır.

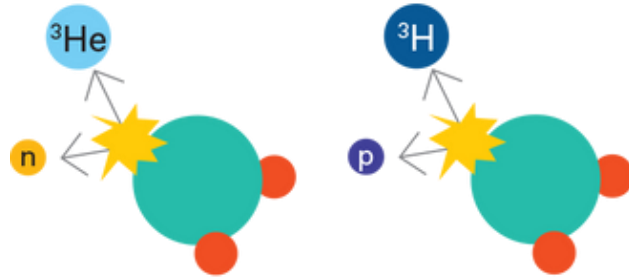


Kafes içerisindeki nötron bir başka döteryum atomuna çarpmak suretiyle döteryuma momentum kazandırmaktadır. Elektronla korunmuş döteryum atomu ise **Coulomb bariyeri (Coulomb barrier)**'ni aşmak için yeterli enerjiye ulaşamadığı takdirde diğer döteryum atomu tarafından tipik olarak itilmektedir.

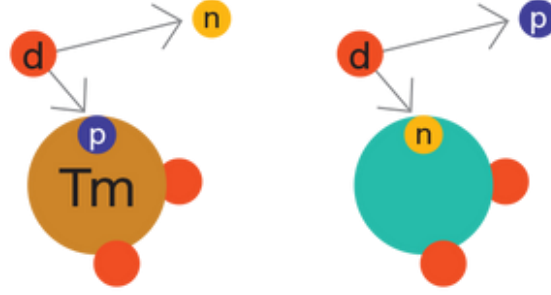


Yukarıda her iki şemada belirtilen termonükleer reaksiyonlar, **nükleer füzyon ateşinin yakılması (Lighting of the Fusion Fire)** olarak yorumlanmaktadır.

Döteryum – Döteryum füzyonu (Deuteron – Deuteron Fusion): Kafes içinde enerji kazanan döteryum atomu diğer döteryum atomu ile birleşerek ve kaynaşarak helyum-3 (^3He) çekirdeği oluşturmakta aynı zamanda çok faydalı bir enerji ortaya çıkarmaktadır. Arta kalan nötron ise başka bir yerde bulunan enerjetik döteryum atomunun itilmesini sağlamaktadır. Alternatif olarak iki döteryum atomu birleşerek hidrojen-3 (^3H) çekirdeği (triton) ve kalıntı bir proton meydana getirmektedir. Söz konusu nükleer kimyasal reaksiyonlar ve nükleer füzyon tepkimeleri ile oluşan nükleer birleşme ve nükleer kaynaşma (füzyon) olayı da çok yararlı bir enerji temin etmektedir.



Nükleer füzyon transfer (sıyırma) ve OP reaksiyonu (Stripping and OP Reaction): Ekstra proton, erbiyum atomunu thulium ([thulium](#)) atomuna dönüştürerek enerji ortaya çıkarmaktadır. Erbiyum atomunun nötronu absorblaması ve soğurması halinde ise yeni bir erbiyum izotopu oluşmaktadır. Söz konusu durum termonükleer fizik dalında [Oppenheimer–Phillips process](#) OP ve nükleer füzyon sıyırma reaksiyonları veya transfer reaksiyonları [stripping reactions](#) olarak adlandırılmaktadır.



Yukarıdaki dört şemada adı geçen aynı zamanda iyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri arasında olan parçacıkların ve gama ışınlarının özellikleri aşağıda açıklanmaktadır.

Proton (p): Pozitif yüklü protonlar ([protons](#)), nötronlar ile beraber atom çekirdeklerini oluşturmaktadır. LCF nükleer füzyon tipi kafesinin bir bölümünde erbiyum atomu tarafından [proton](#) parçacıklarının absorblanması ve soğurulması neticesinde döteron transfer tepkimeleri (deuteron [stripping reactions](#)) meydana gelmektedir.

Nötron (n): Yüksüz olan nötronlar ([neutrons](#)), protonlar ile birlikte atom çekirdeklerini teşkil etmektedir. Nükleer füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeler esnasında ortaya çıkan enerji ise döteron ([deuterium](#) - deuteron) gibi diğer parçacıklara transfer edilmektedir. Ayrıca, nötronlar [Oppenheimer–Phillips](#) (OP) tepkimeleri kapsamında soğurulmaktadır.

Erbiyum (Er) ve Titanyum (Ti): Erbiyum ([erbium](#)) ve titanyum ([titanium](#)), LCF nükleer füzyon enerjisi modeli metal seçimleri olarak dikkat çekmektedir. Nükleer füzyon tepkimeleri ve termonükleer reaksiyonlar içerisine giren diğer parçacıklara göre çok daha büyük boyutlarda olan söz konusu metaller, döteronları (deuterons) etkilemek suretiyle birbirinden ayırmaktadır.

Döteryum (d): Döteryum ([deuterium](#)) çekirdeği bir nötron ve bir protondan ibarettir. Döteryum, LCF termonükleer reaksiyonları için can alıcı parçacık sayılmaktadır.

Döteron: Döteryum ([deuterium](#)) atomunun çekirdeğidir. Döteronlar (deuterons), LCF nükleer füzyonu için çok büyük bir önem taşımaktadır. Enerjetik döteronlar tarafından termonükleer kafes içindeki diğer döteronlar parçalanarak gerçek nükleer füzyon

etkileşmeleri oluşturulmaktadır. Ayrıca, döteronlar da sıyırma tepkimeleri ve transfer reaksiyonları ([stripping reactions](#)) sonucu parçalanmaktadır.

Hidrojen-3 (trityum): Döteron - döteron (deuteron - deuteron) nükleer füzyonu neticesi arta kalan bir proton ile birlikte oluşabilmektedir. Trityum ([tritium](#)) çekirdeği bir proton ve iki nötrona sahip olup, ayrıca [triton \(physics\)](#) olarak da adlandırılmaktadır.

Helyum-3 (³He): Döteron - döteron nükleer füzyon reaksiyonunda arta bir nötron ([neutrons](#)) ile beraber hasil olabilen bir parçacıktır. Helion ismi de verilen helyum-3 ([helium-3](#)) çekirdeği, iki proton ve bir nötron ihtiva etmektedir.

Alfa parçacığı: Normal helyum çekirdeği, iki proton ve iki nötrondan meydana gelmektedir. Alfa parçacığı (α) ([alpha particle](#)), tipik nükleer füzyon reaktörleri ünitelerinde çok defa döteryum ve trityum ile beraber parçalanmaktadır. Ayrıca, alfa parçacıkları **LCF** nükleer füzyon tepkimeleri sonucu da ortaya çıkmaktadır.

Gama ışını (γ): Aşırı derecede enerjik olan gama ışınları, diğer bir deyimle, yüksek enerjili fotonlar; metal kafes içerisinde nükleer füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeler başlatarak döteronların parçalanmasını sağlamaktadır.

Karbonsuz çevre dostu nükleer füzyon reaktörleri genellikle iki farklı hidrojen izotopu kullanmaktadır. Söz konusu hidrojen izotopları; bir proton ve iki nötronlu döteryum izotopu ile bir proton ve iki nötronlu trityum izotopudur. Döteryum ve trityum izotopları, iki proton ve iki nötronlu helyum çekirdeği içinde nükleer kaynaşma - nükleer birleşme, bir başka deyişle nükleer füzyon proseslerine uğramak suretiyle bir nötronun açığa çıkmasına neden olmaktadır. Klasik nükleer füzyon reaktörleri, alfa parçacıklarının oluşması neticesi oluşan enerjinin nükleer plazma sistemini ısıtması prensibine dayanmaktadır. Günümüzde nükleer plazma içinde çok daha fazla nükleer tepkimeler ve nükleer reaksiyonlar yaratılarak önemli olan net güç üretimi kazancı hedeflenmektedir. Ancak, net termo nükleer güç üretimi verimi ise ne yazık ki sınırlı düzeyde kalmaktadır. Füzyon reaktörleri aşırı derecede sıcak olan nükleer plazmalar oluştursa bile alfa parçacıkları enerjinin çoğunu transfer etmeyerek ilave döteryum çekirdekleri için harcamaktadır. Bir nükleer füzyon reaktörü ünitesinin net enerji kazanımı için alfa parçacıkları ve döteryum çekirdeklerinin mümkün olduğunca doğrudan etkileşmelerinin sağlanması zorunlu görülmektedir. Bilim insanları 1950'li yıllarda çeşitli manyetik sınırlamalı füzyon ([magnetic confinement fusion](#) - **MCF**) makineleri geliştirmiştir. Örneğin, [Andrei Sakharov](#)'un keşfi **tokamak** tasarımı nükleer füzyon reaktörü ve [Lyman Spitzer](#)'in buluşu olan **stellarator** dizaynı termonükleer tesis dikkat çekmiştir. Dizayn farklılıklarına rağmen o zamanlar her iki nükleer füzyon tasarımı ile de istenilen sonuca ulaşamamıştır. Nükleer plazma oluşumu için gazın yeterince ısıtılması ve nükleer füzyonu başlatmak için gazın manyetik olarak sıkıştırılması sağlanmasına rağmen arzulanan netice alınamamıştır.

Atalet sınırlandırma füzyon ([inertial confinement fusion](#) - **ICF**) makinası ise 1970'li yıllarda popüler hale gelmiştir. **ICF** nükleer füzyon reaktörleri kapsamında doğrudan yüksek basıncı körükleyerek hedef yüzeyinin sıkıştırılması ya da dolaylı yüksek basınç altında target kabınının enerjik hale getirilmesi için lazerler ve iyon demetleri kullanılmıştır. Manyetik sınırlamalı füzyon **MCF** reaksiyonlarından farklı olarak nükleer füzyon tepkimeleri saniye, hatta dakika ve bazı zamanlar da süresiz bir gün

boyunca sürmüştür. Tesiste target sökülmeden önce ise atalet sınırlandırma füzyon ([inertial confinement fusion](#) - ICF) tepkimeleri, mikrosaniye mertebesinde daha az bir süre devam ederek nükleer füzyon reaksiyonları son bulmuştur. **MCF** ve **ICF** tipi termonükleer tesisler içeriğinde nükleer füzyon reaksiyonları gerçekleşebilmesine rağmen nükleer füzyon tepkimelerinin başlatılması ve sürdürülmesi için yeterli enerjiye ulaşılması mümkün olmamaktadır. Manyetik hapsedme füzyonu ([magneto-inertial fusion](#) - MIF) modeli gibi hibrit nükleer füzyon türleri sınıfından olan termonükleer reaktörler de aynı sorunlar ile karşılaşmaktadır. Diğer taraftan, çevreci nükleer füzyon reaktörleri termonükleer yakıtları da çok büyük miktarlarda trityuma gereksinim duymaktadır. Trityum izotopunu temini açısından en güvenilir kaynağı ise baz yüklü karbonsuz nükleer füzyon reaktörleri oluşturmaktadır. Ayrıca, doğa dostu inovatif nükleer füzyon santralleri kurulması çalışmalarının olumlu yönde ilerlemesi halinde yeni nesil nükleer füzyon santralleri gelişimi yönünden ciddi bir dezavantajın ortaya çıkması da beklentiler arasında sayılmaktadır. Öte yandan, **Coulomb bariyeri** ([Coulomb barrier](#)) nedeni ile atom çekirdeklerinin nükleer kaynaşması - nükleer birleşmesi yani nükleer füzyon olayı gerçekleşmesi çok küçük bir nükleer kesiti ([cross section](#)) içerisinde meydana gelmektedir. Böylece, iki parçacığın nükleer kaynaşma tepkimeleri ve nükleer füzyon reaksiyonları içine girmesi olasılığı da oldukça düşük düzeylere indirgenmektedir. Nükleer plazma sıcaklığı rakamının devasa 100 milyon °C derece santigrat düzeyine kadar yükseltilmesi durumunda etkileşme kesitinin artırılması ihtimali de doğmaktadır. Söz konusu sıcaklıkta nükleer plazmanın sınırlandırılması ve limitlenmesi için ise yoğun inovatif termonükleer füzyon enerjisi **Ar-Ge** çalışmaları yürütülmesi zorunlu kabul edilmektedir. Ayrıca, nükleer plazma içeriğinde çok yüksek sıcak füzyon (hot fusion - [thermonuclear fusion](#)) elde edilmesi bağlamında milyarlarca dolar finansman olanakları sağlanması ve termonükleer **Ar-Ge** faaliyetleri için 10 - 20 yılı kapsayan uzunca bir süreye de gerek duyulmaktadır. Yeryüzünde sıcak füzyon oluşturulması, bir başka deyimle, dünyada bilim insanları tarafından suni güneş yaratılması için çok büyük engellerin aşılması gerekmektedir. Öte yandan, nükleer füzyon reaktörü komplekslerinin uzay araçları yolculuklarında kullanımı yönünde sorunlar da bulunmaktadır. Örneğin, çok büyük boyutları olan **tokamak** tipi termonükleer reaktör ünitesi ile **stellarator** tasarımı nükleer füzyon kompleksi elektrik üretimleri sistemlerinin robot uydulara yüklenmesi imkânsız kabul edilmektedir. Nükleer füzyon makineleri ve donanımlarının büyüklüğü karşısında mikro inovatif nükleer füzyon reaktörleri uzayda sürdürülebilir güç üretimleri açısından önemli bir alternatif olarak belirlemektedir. **ABD Uzay ve Havacılık Dairesi NASA** tarafından kağıt havlu rulosu boyutunda zenginleştirilmiş uranyum-235 (U-235) yakıtlı yenilikçi mini nükleer füzyon elektrik reaktörü ünitesi 2018'de **Nevada Ulusal Güvenlik Sahası** ([Nevada National Security Site](#) - **NNSS**) içerisinde denenmiştir. Test edilen inovasyona dayalı küçük nükleer füzyon güç reaktör kompleksi [Kilopower](#) reaktörü adı ile anılmaktadır. Mini **Kilopower** elektrik reaktörü, 10 kilowatt'lık nükleer güç üretimi temin etmektedir. Ancak, son derece yüksek radyoaktif zenginleştirilmiş uranyum-235 (U-235) yakıtlı robot uydusu aracının uzaya gönderilmesi sırasında çok sıkı ilave nükleer güvenlik ve nükleer emniyet tedbirleri ile birlikte radyasyon güvenliği önlemleri alınması gerekliliği ise çok ciddi bir dezavantaj sayılmaktadır. Ayrıca, zenginleştirilmiş U-235 maliyetleri rakamlarının çok yüksek seviyelere kadar ulaşması da bir başka önemli olumsuzluk olarak değerlendirilmektedir.

Bazı kesimler açısından klasik sıcak füzyon oluşturulması yaklaşımları, umutsuz girişim ve boş bir fikir görüntüsü sergilemesine karşın günümüzde karbonsuz füzyon

enerjisi kazanımı ve doğa dostu termo nükleer güç üretimi üniteleri kurulması çalışmaları güncelliğini korumaktadır. Örneğin, kafese limitlenmiş füzyon ([lattice confinement fusion](#)- **LCF**) teknolojisi sayesinde yenilikçi nükleer füzyon enerjisi elektrik üretimleri gerçekleştirilmesi olası görülmektedir. Örneğin, küçük boyutlu, hafif ve teferruatlı donanımları olmayan **LCF** termonükleer enerji kökenli kompakt nükleer füzyon reaktörü ile çalışan uzay araçları yapımları hız kazanmaktadır. **LCF** füzyon teknolojisi kapsamında çekirdeğinde bir proton ve bir nötron bulunan hidrojen atomunun izotopu döteryum önem taşımaktadır. **LCF** termonükleer füzyon tekniği içeriğinde özellikle döteryumla satüre edilmiş erbiyum ve titanyum metalleri öne çıkmaktadır. Denemelerde erbiyum ve titanyum elementleri; ya döteryum ile ya da elektronlarından arınmış döteryum atomları olan döteronlar (deuterons) vasıtasıyla doygun ve satüre hale getirilmektedir. Söz konusu düzenli kafes yapısı sayesinde döteronların yuvalanması için metaller arasında eşit tarzda konumlandırılan yerleşim yerleri oluşmaktadır. Kafes yapı içerisinde düzenli ve doğal biçimde metal bulunması nedeniyle yukarıda belirtilen durum olası kılınmaktadır.

Tokamak dizaynı nükleer füzyon reaktörü veya **stellarator** tasarımı termonükleer üniteler içindeki döteronların yoğunluğu metre küp başına 10^{14} olmak üzere sınırlı seviyede kalmaktadır. Atalet limitlendirme füzyon ([inertial confinement fusion](#) - **ICF**) makineleri içerisinde ise döteron yoğunlukları aniden metre küp başına 10^{26} düzeyine kadar fırlamaktadır. Erbiyum, metaller kapsamında döteronları süresiz tutulabilmekte ve döteron yoğunlukları da metre küp başına yaklaşık 10^{23} seviyesine kadar çıkmaktadır. Manyetik sınırlamalı füzyon ([magnetic confinement fusion](#) - **MCF**) reaktörü sistemlerine kıyasla atalet sınırlandırma füzyon ([inertial confinement fusion](#) - **ICF**) makinesi, daha büyük döteron yoğunluklarına ulaşmaktadır. Ayrıca, erbiyum ve titanyum metallerinin oda sıcaklığında çok sayıda iyon tutabilme yeteneği de son derece önemli bir özellik taşımaktadır. Döteronla satüre olmuş metal, nötr yüklü bir nükleer plazma meydana getirmektedir. Tüm pozitif yüklü döteronlar, elektron perdelemesi ile metal kafes içerisinde sınırlandırılmaktadır. Söz konusu perdeleme ve sınırlama sayesinde parçacıkların direkt etkileşme olasılıkları artırılarak sürdürülebilir füzyon reaksiyonları ve güçlü termonükleer tepkimeler yaratılmaktadır. Elektron perdelemesi olmaması halinde ise iki döteronun birbirini itme ihtimali daha yüksek düzeylere erişmektedir. Yoğun biçimde perdelenen döteronların soğuk plazması ve metal kafes kullanılması aynı zamanda **Dynamitron elektron demeti hızlandırıcısı (Dynamitron electron-beam accelerator)** devreye alınması suretiyle nükleer füzyon prosesinin ivme kazanması sağlanabilmektedir. Elektron demeti tantal ([tantalum](#)) targete çarptığında gama ışınları oluşmaktadır. Böylece, titanyum deuterit ve erbiyum deuterit ihtiva eden önceden küçük şişelere doldurulmuş numuneler ışınlanmaktadır. Gama ışını enerjisi 2.2 megaelektron volt (MeV) düzeyine ulaştığı zaman metal kafes içindeki döteronlar birbirine çarparak döteronu proton ve nötron halinde parçalamaktadır. Meydana gelen nötronun bir başka döterona çarpma olasılığı da artmaktadır. Bu durum ıstaka ile bilardo topunun hızlanarak diğer bilardo topuna çarparak hızlandırılmasına benzetilmektedir. Ortaya çıkan enerjetik döteron ise ya perdelenmiş füzyon (screened fusion) ya da transfer reaksiyonu (stripping reaction)'na uğramaktadır.

Perdelenmiş füzyon kapsamında kafes içinde enerjetik döteronun diğer bir detoronla birleştiği gözlenmektedir. Füzyon reaksiyonu; ya bir helyum-3 çekirdeği ve arta kalan bir nötron ile ya da hidrojen-3 çekirdeği ve arta kalan bir nötronla oluşacaktır. Söz konusu nükleer füzyon ürünleri alfa parçacığı yaratarak diğer döteronlar ile

birleşebilmekte veya bir başka helyum-3 ve hidrojen-3 çekirdeği ile kaynaşabilmektedir. Ortaya çıkan nükleer reaksiyonların her biri füzyon olaylarının körüklenmesi ve ateşlenmesine olanak tanımak suretiyle enerji açığa çıkmasına neden olmaktadır. Transfer reaksiyonu (stripping reaction) içeriğinde ya titanyum ya da erbiyum gibi bir atom, döterondan proton veya nötron transfer etmektedir. Böylece, proton veya nötronu yakalamaktadır. Erbiyum, titanyum ve diğer daha ağır atomlar, protonun pozitif yüklü çekirdeği itmesi ([Oppenheimer-Phillips OP](#) reaksiyonu) nedeniyle tercihan nötronu soğurmaktadır. Teorik olarak mümkün olmasına rağmen belirtilen durum deneyde gözlenmemektedir. Elektron perdelemesi çerçevesinde ise erbiyumun tolyum haline dönüşmesi veya talyumun vanadyuma transformasyonu sayesinde proton yakalaması sağlanabilmektedir. Transfer reaksiyonlarının her ikisi ile de faydalı enerji elde edilebilmektedir. Nötron spektroskopisi ([neutron spectroscopy](#)) kullanılarak erbiyum deutirit ve titanyum deutirit numuneler ile yerine getirilen deneyde gerçek bir nükleer füzyon hadisesi gözlemlendiği ortaya çıkmaktadır. Söz konusu teknikle füzyon reaksiyonlarında meydana gelen nötronlar dedekte edilmektedir. Döteron - Döteron füzyonu bir helyum-3 çekirdeği ve bir nötron oluşturduğu zaman nötronun enerjisi 2.45 MeV düzeyinde bulunmaktadır. Böylece, 2.45 MeV'lik nötron dedekte edilmesi ise nükleer füzyon olayının gerçekleştiğini işaret etmektedir. Yapılan deneyin sonuçları Fizik Dergisi [Physical Review C](#)'de yayımlanmıştır. Döteronlar, 11 milyon °C derece santigrat sıcaklığında nükleer birleşme - nükleer kaynaşma yani nükleer füzyon reaksiyonları ve tepkimelerine uğramaktadır. Füzyona uğrayan döteronlar, oda sıcaklığının biraz üstüne kadar ısıtılmasına karşın metal kafes ise çok daha soğuk bir sıcaklıkta kalmaktadır. Kafese limitlenmiş füzyon ([lattice confinement fusion - LCF](#))'unda sadece yaklaşık mikrometre büyüklüğünde bir bölge ısıtılmaktadır. Manyetik sınırlamalı füzyon ([magnetic confinement fusion - MCF](#)) ve atalet sınırlandırma füzyon ([inertial confinement fusion - ICF](#)) reaktörlerinde ise tüm yakıt çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaktadır. Bu durum **MCF** ve **ICF** termonükleer reaktörleri sistemlerine göre **LCF** nükleer füzyon ünitesi komplekslerini çok daha verimli kılmaktadır. **LCF** tipi nükleer füzyon tasarımı soğuk füzyon değildir. **LCF** dizaynı nükleer füzyon için hâlâ enerjetik döteronlar gerekirken, döteronların ısıtılması için nötronlar kullanılmaktadır. Ayrıca **LCF** nükleer füzyon teknolojisi, diğer füzyon enerjisi tasarımlarının karşılaştığı ve başarılı olmalarının önleyen engellerin çoğunu da aşmaktadır.

Nötron geri tepme tekniği (neutron recoil technique) karşısında enerji yoğun **Dynamitron** kanalıyla oluşan nötronların döteronları soğutması ve enerji transfer edilmesi için çoğunlukla verimli radyoaktif kaynaklar kullanılmaktadır. Örneğin, reaksiyonları başlatmak için amerisyum - berilyum (americium - beryllium) veya kaliforniyum (californium-252) izotopik nötron kaynakları (isotopic neutron source) kullanılması da dahil olmak üzere nötronların üretimi için daha düşük enerji yöntemleri de bulunmaktadır. Ayrıca, kendi kendine devam eden nükleer füzyon reaksiyonlarının oluşturulması da gerekmektedir. Kafes içerisine nötronların geri gönderilmesi bağlamında nötron yansıtıcı ([neutron reflector](#)) kullanımı olası görülmektedir. Karbon ve berilyum, nötron yansıtıcılarına örnek teşkil etmektedir. En olumlu ortamı sağlamak için bir başka seçenek ise fisyon yakıtı ile bir füzyon nötron kaynağını eşleştirmektir. Her şeye rağmen kafese limitlenmiş füzyon ([lattice confinement fusion - LCF](#)) reaksiyonları açısından verimliliğin artırılması için gerekli olan termonükleer proseslerin geliştirilmesi ve ilerletilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, döteryumlu palladyum ([palladium](#))'un elektroliz yoluyla yüklenmesi ve

palladyum-gümüş alaşımli ince bir duvar içerisinde döteryum gazının pompalanması vasıtasıyla da nükleer füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeler başlatılmaktadır. Deneyin daha sonraki safhasında hızlı nötronlar dedekte edilmektedir. Nötronların enerjisini ölçmek için yukarıda anlatılan aynı nötron spektroskopisi dedeksiyon yöntemi ve prosesi, elektroliz düzeneği deneyinde de kullanılmaktadır. Enerji ölçümleri ise oluşan nükleer füzyon reaksiyon türleri ve termonükleer tepkime çeşitleri hakkında bilgi vermektedir. Kafese sınırlı füzyon ([lattice confinement fusion](#) - **LCF**) enerjisi çalışmalarına dair diğer **ABD** kuruluşları da yoğun araştırmalar yürütmektedir. Örneğin, Kaliforniya Eyaleti'nde konuşlu **Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı** ([Lawrence Berkeley National Laboratory](#) - **LBNL**), **Google Araştırma** (**Google Research**) fonları vasıtasıyla elektron perdelemesi nükleer füzyon enerjisi deney düzeneği kapsamında benzer olumlu sonuçlara ulaşmıştır. Ayrıca, Maryland Eyaleti'nde bulunan [Naval Surface Warfare Center, Indian Head Division](#) Merkezi bilim insanları da **LCF** nükleer füzyon enerjisi içeriğinde elektrokimyasal bir yaklaşım kullanarak umut veren sonuçlar elde etmektedir. **LCF** nükleer füzyon enerjisinin pratikte uygulanması bağlamında verimli ve kendi kendine devam eden termonükleer reaksiyonlar gerekmektedir. Yapılan deneylerde ilk adım olarak sadece yukarıda ifade edilen hedefe ulaşılması amaçlanmaktadır. Sonuçta, nükleer füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeler önemli ölçüde artırılması halinde karbonsuz **LCF** nükleer füzyon teknolojisi sayesinde yeryüzünde sürdürülebilir, temiz, doğa dostu, çevreci ve yeşil nükleer enerji oluşturulması yolu açılarak gelecekte çok uzun uzay araçları yolculukları ile birlikte dünyadaki konutların ve işyerlerinin karbondioksit emisyonları olmayan baz yüklü termo nükleer güç kullanması olanağı da sağlanacaktır.

Kaynaklar:

- Radyoaktif Atıkların Yok Edilmesi veya Nihai Depolanması, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2006.
- Nükleer Atıkların İdaresi ve Yönetimi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO**, 2007.
- Atom, Radyoaktivite, Radyoizotoplar ve Radyasyon Türleri, Ahmet Cangüzel Taner **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Nükleer Güç Santralleri Gelişiminde Nükleer Emniyet ve Nükleer Güvenlik, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Evren, İnsan ve İyonlaştırıcı Radyasyonlar, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2010.
- İyonlaştırıcı Radyasyonların Biyolojik Etkileşme Mekanizmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Nükleer Füzyon Enerjisi (Nükleer Kaynaşma Birleşme Enerjisi) Termonükleer Füzyon Santralleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Mars Gezegeni Keşifleri için Kızıl Gezegen Mars'a Son Gönderilen Plutonyum-238 (Pu-238) Yakıtlı Uzay Araçları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011
- Nükleer Güç ile Çalışan Uzay Araçları ve Kâinatın Keşfi için Uzaya Fırlatılan Plutonyum-238 (Pu-238) Nükleer Yakıtlı Robot Uydular, Ahmet Cangüzel Taner **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011
- Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Kapsamında Güneş Kökenli Nükleer Füzyon Enerjisi Güç Üretimi Amaçlı Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü **ITER**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2014.
- İnovasyona Dayalı Yeni Nesil Stellarator Termonükleer Füzyon Makinesi ve

- Yenilikçi Tokamak Füzyon Enerjisi Reaktörü Arasındaki Teknolojik Rekabet, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (**Radioisotope Thermoelectric Generator – RTG**) İnovasyon Teknolojili Plutonyum 238 Atom Yakıtlı Robot Uzay Araçları, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Kyoto Protokolü Sonrası Olası **BM 2015 Paris İklim Değişikliği Anlaşması Dünya Karbondioksit Emisyonları Artışları ve Yok Edilmesi Teknolojileri**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- ABD Nükleer Güç Santralleri NGS İşletilmesi ve Nükleer Yakıt Çevrimi Sonrası Radyoaktif Atıkların Saklanması ve Nükleer Kalıntıların Depolanması Sorunları**, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Gezegeğin Geleceği Açısından Hemen Gündeme Alınması Gereken Sorunlar Arasında Sayılan Küresel Isınma ve Global İklimsel Değişim Mekanizmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Finlandiya **Nükleer Güç Santralleri NGS İşletilmesi Sonucu Oluşan Nükleer Atıkların Ulusal Radyoaktif Maddelerin Yönetimi Kapsamında Bertarafı**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
- Dünyanın En Büyük Termonükleer Deneme Reaktörü **ITER Projesi Kanalıyla Nükleer Karbonsuz Füzyon Güç Santralleri Yapımları Gerçekleştirilmesi**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2019.
- Olumlu Termonükleer Bilimsel Araştırmaları Doğrultusunda Ticari Karbonsuz Nükleer Füzyon Elektrik Santralleri Kurulması Hakkında Özel Sektör İlgisi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2019.
- İngiltere Tokamak Tipi Nükleer Füzyon Reaktörü Çalıştırılması ve Geleceğin Karbonsuz Baz Yüklü Termonükleer Güç Santralleri İçin Öncü Rolü, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Küresel Karbonsuzlaştırma Teknolojileri Perspektifleri ile 21. Yüzyıl Global Isınma ve İklim Değişiklikleri Sorunları Dizginlenmesi Stratejileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Dünya Karbonsuzlaştırma Devrimi Süreci Başlatan **Birleşmiş Milletler BM 2015 Paris İklim Anlaşması Hükümleri Uygulamalarının Durumu ve Geleceği**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Amerikalı Nükleer Füzyon Enerjisi ve Nükleer Plazma Fizikçileri Termo Nükleer Elektrik Santralleri Kurulması Mali Destekleri için İşbirliği Çalışmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Temel Güç Kaynakları Karbonsuz Mini Nükleer Elektrik Reaktörleri ve Global Nükleer Yakıt Erimesi Kazaları Karşısındaki Teknolojik Üstünlükleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Küresel Termonükleer Araştırmaları ve Karbonsuz Temel Enerji Kaynağı Birinci Nesil Nükleer Füzyon Elektrik Santralleri Kurulması Çalışmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2021.
- Global Sıfır Karbon Emisyonları Projeksiyonları Yönünde Ticari Sürdürülebilir Temel Enerji Kaynağı Karbonsuz Nükleer Füzyon Santralleri Kurulması, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2021.
- NASA's New Shortcut to Fusion Power, Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE Spectrum Dergisi**, 27 Şubat 2022.

Fizik **Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler
www.fmo.org.tr/_yayinlar/faydali-bilgiler