

## NÜKLEER FÜZYON REAKTÖRLERİ VE KÜRESEL TOKAMAKLAR

# NÜKLEER FÜZYON

Doç.Dr. Ayten Sinman\*  
Prof.Dr. Sadrettin Sinman\*

Dünyanın şu anda içinde bulunduğu ve gelecek yıllarda giderek büyüyecek enerji krizine karşı uzmanların önerileri, yeni milenyumun ilk birkaç on yılı içinde devreye girmesi beklenen nükleer füzyon enerjisi üzerinde yoğunluk kazanmış durumda. Çevre ve radyoaktif kirlilik bakımından temiz, yakıt bolluğu nedeniyle de tükenmez bir enerji türü olan füzyon enerjisinin olabildiğince kısa zamanda devreye sokulması amaçlanıyor. Gelişmiş ülkeler ulusal ve uluslararası çok sayıda araştırma projesi başlatarak ve var olanları da güncelleştirerek, büyük bir kararlılık içinde hedefe doğru var hızlarıyla ilerliyorlar. Nükleer füzyon reaktörü için birkaç tip aday üzerinde durulmakla beraber, bunlar arasında en güvenilir, umut verici ve sorunları

büyük ölçüde çözülmüş, olan, kalan teknolojik sorunlarınsa çözüm yöntemlerinin saptandığı en kuvvetli reaktör adayı, tokamak adı verilen düzenekler.

Tokamak düzenegi, adımı ilk tasarımcısı Artsimovich'in önerisiyle, Rusça sözcüklerin başharflerinden alıyor (Toroid Kamera Magnit Katushka) ve basit bir transformatör özelliğine dayanarak çalışıyor. Çalışma esasıyla plazmanın korunması. Maddenin 4. hali de denen plazma, elektronlarını yitirmiş atom çekirdekleriyle, serbest kalmış elektronlardan oluşan sıcak gaz verilen isim. Tokamak düzeneklerinde, plazma halinde hidrojen, helyum ve bor gibi hafif elementlerden oluşmuş yakıtlar, yuvarlak pasta kalıbı ya da geometrideki adıyla torus bi-

çimindeki bir kap içinde, bir transformatörün tek sarımlı kısa devre ikinci sargısı aracılığıyla korunuyor. Transformatörün birinci sargısıysa, geometriyi basitleştirmek amacıyla, torun eksenindeki merkez oyuğuna, tora paralel konumda yerleştiriliyor. Böylece, hem plazma akımı oluşturuluyor, hem de oluşan plazma dirençsel şekilde ısıtılıyor. Plazma içindeki hafif çekirdeklerin birleşerek daha ağır çekirdekler oluşturması ve bu yolla enerji açığa çıkarması için plazmanın çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması gerekiyor. Toroidal kabın ortasındaki plazmanın soğumaması için duvarlardan yalıtılıp, uzun süre sıcak halde korunması ve böylece nükleer füzyon reaksiyonlarının kesintisiz bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekiyor. Bu amaçla, torun çev-



TAEK Nükleer Füzyon Laboratuvarı'nda geliştirilen STPC küresel tokamağının genel görünümü ve düzenegi geliştirilen Sinman'lar. Yalnızca 65 litre hacimli akı koruyucusuna sahip düzenek, şimdilik bir "model" sağlamanın ötesinde bir işleve sahip değil. Gene de merkezi bir mıknats çubuğuna gerek bırakmayan plazma enjeksiyonuna dayalı orijinal tasarımı, dünyada yürütülen çok daha ileri teknolojiadaki küresel tokamaklar için bir esin kaynağı. Füzyon araştırmalarında Türkiye'nin hakkı olan yere gelebilmesi için gereken, "lüks bir makam arabası" maliyetiyle, düzenegin boyutlarının üç katına yükseltilmesi. Böylelikle deney sonuçları da, "konsept" katkısının yanı sıra dünya füzyon literatürüne girebilecek. Sağda Amerika'daki NSTX küresel tokamağının merkez çubuğunun montajı görülüyor.

resi boyunca yerleştirilen çok sayıda manyetik alan bobiniyle toroidal manyetik alan oluşturuluyor. Bu nedenle, bu tip düzeneklere aynı zamanda toroidal manyetik korunma sistemleri de deniliyor.

Dünyada 1960 yılından bu yana, araştırma amacıyla yüzlerce tokamak makinesi kurulmuş bulunuyor. 1960-1967 yılları arasında Türkiye'de de İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Atom ve Çekirdek Fiziği Kürsüsü'nde, araştırma amacıyla, dünyadaki benzerleriyle aynı boyut ve özelliklerde, iki ayrı tokamak düzenegi geliştirilerek kuruldu, çalıştırıldı ve üzerinde özgün yüksek lisans ve doktora düzeyinde araştırmalar yapıldı.

Giderek büyüyen tokamaklar günümüzde devasa boyutlara ulaşmış durumda; üzerlerinde yapılan araştırmalarda, çok sayıda ekip tarafından yürütülen geniş bir disiplinlerarası nitelik taşıyor. Böyle bir tokamak araştırma ekibinde, nitelikli fizikçilerin, elektronikçi, malzemeci, bilgi işlemci ve kimyacıların, özel sektörün de mevcut teknoloji desteğiyle, uyum içinde çalışması gerekiyor.

Geçen milenyumun son yıllarında birbiri peşisıra kurulan üç tokamak, füzyon reaktörüne giden yolda, en önemli kilometre taşı olan ve füzyon çı-

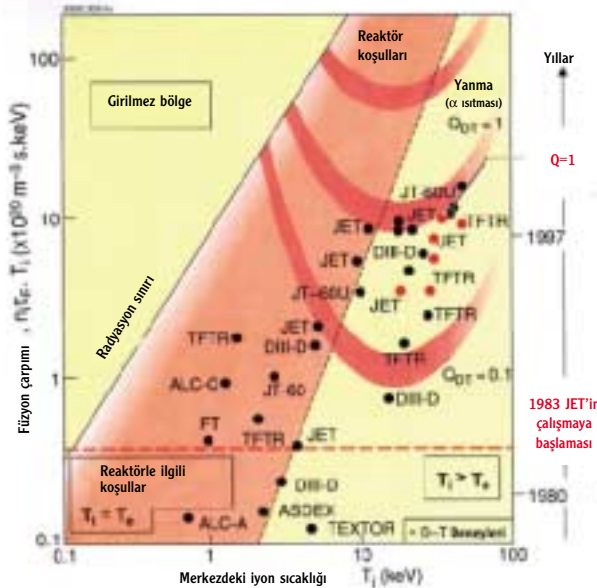
kış gücünün sisteme giriş gücüne oranıyla tanımlanan Q faktörünü  $Q = 1$ 'lik düzleğe çıkış (breakeven) noktasına

ulaştırarak, füzyon enerjisi final kurdelelerinin ilkini göğüslediler. Bunlar, tüm Avrupa topluluğu üyelerinin ortak insan gücü ve mali desteğiyle, İngiltere'nin Culham Laboratuvarı'nda kurulan JET (Joint European Torus); ABD'nin Princeton Üniversitesi Plazma Fiziği Laboratuvarı'nda (PPPL) bulunan TFTR (Thermonuclear Fusion Test Reactor) ve Japonya'nın Atom Enerjisi Kurumu, Naka Araştırma Merkezi'nde, ülkenin en büyük altmışıncı gelişkin tokamağı JT-60U. Şu anda, yukarıda anılan düzeneklerin yanısıra dünyadaki diğer birçok düzenekte de plazmayı daha yoğun ve sıcak hale getirerek, sıcaklığın uzun süre korunması ve Q değerinin büyütülmesi için çalışmalar yapılıyor. Yeni

kurulacak füzyon reaktörlerine ışık tutacak bilimsel ve teknolojik ilerlemeler kaydedildikçe de güncelleştirme çalışmalarına gidiliyor.

## Küresel Tokamak Programları

Bugüne kadar kurulan tokamak düzeneklerinde kazanılan deneyimlerden yararlanarak, ileride kurulacak



Şekilde, JET, TFTR, JT-60U ve Amerika-General Atomics'deki DIII-D füzyon düzeneklerinin zamanla kaydedilen performans gelişimi şematik olarak görülüyor. Şemada, apsisi keV cinsinden plazma iyonlarının sıcaklığını, ordinat eksenine ise, Lawson kriteri olarak bilinen,  $n$  plazma yoğunluğu ile  $t$  sıcak korunma zamanı çarpımının, sıcaklıkla çarpıldığı, füzyon çarpım faktörünü (Fusion Product) gösteriyor. Şema üzerinde, sağ taraftaki yıllar incelenecek olursa, örneğin, JET düzeneginde, 1983 yılında çalışmaya başladığından bu yana, füzyon çarpım faktöründe 25 000 katlık bir gelişim kaydedildiği ve  $Q=1$  noktasından sonra reaktör koşulluna ulaşmak için katedilmesi gereken yolun fazla uzun olmadığı görülüyor.





Oluşturulan küresel tokamağın, kap üzerindeki tanı penceresinden özel bir teknikle alınmış fotoğrafı. Fotoğrafın sağ tarafında, uzamış D biçimindeki küresel tokamak şekillenmesi oldukça belirgin; sol tarafta görülmesi gereken simetrik yarı-küreyse, yüksek enerjili plazma enjektörünün, küresel tokamak şekillenmesinden kısa bir süre önce filmi etkilemesi nedeniyle arka planda kalarak görülmüyor.

daha ekonomik ve yüksek teknolojlili tokamak tipindeki füzyon güç reaktörlerinin, mümkün olduğunca küçük boyutlu (kompakt) ve daha düşük maliyetli olması, uzun süre sıcak şekilde korunabilmesi ve sürekli olarak çalışmasının küçültülebilmesi için, tokamak düzenekleri, “spheromak” ve “küresel tokamak” gibi kompakt toroid şekillenmelerine doğru kaydırılıyor. Bu yeni tokamak şekillenmelerinde, torun büyük yarıçapı R küçültülerek, küçük

yarıçapı r'ye yaklaştırılmaya çalışılıyor. Yani “görünüm oranı (aspect ratio)” olarak tanımlanan  $A = R/r$ 'nin en küçük değerinin 1'e yaklaşmasıyla plazma kanalı küresel hale geliyor. Buna göre, küresel tokamaklar, küçük görünüm oranlı tokamaklar olarak da tanımlanıyor. Halen çalışmakta olan geleneksel tokamaklarda A oranı 3 ve 4 civarında. Örneğin, Amerika'nın TFTR ve Japonya'nın JT-60U tokamaklarında  $A = 3$ , AB'nin JET'inde  $A = 2.2$  ve Rusya'nın T-10 tokamağın

## Uluslararası Füzyon Reaktörü Programı

İlk kez, G-7 koduyla adlandırılan Batı Ekonomik Zirvesi'nde, nükleer füzyon reaktörleri konusu gündeme geldi. Dünyadaki artan ekonomik büyüme için, uluslararası karşılıklı işbirliği çerçevesinde, füzyonun önemli potansiyele sahip bir konu olduğu hakkında karar alındı. Cenevre'de 1985 yılında toplanan Başkanlar Zirvesi'nde, Reagan, Gorbaçov ve Mitterand, bir uluslararası termonükleer füzyon deneysel reaktörü (ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor) projesinin başlatılması için prensip kararı aldılar. İlk adımda, 1988-1992 yılları arasında, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) önderliğinde, ABD, Avrupa Topluluğu ve zamanın Sovyetler Birliği'nin katılımıyla, ITER projesinin kavramsal tasarım etkinlikleri CDA (Conceptual Design Activity) yürütüldü ve tamamlandı; proje Japonya'nın da üye olması kabul edildi. Projede böylece, dört üyenin katılımıyla, 1992-1998 yılları arasındaysa ITER'in mühendislik tasarım etkinlikleri EDA (Engineering Design Activity) sürdürülerek, sonunda, çalışmalar hakkında ayrıntılı sonuç raporu hazırlandı. İş, makinenin kurulması aşamasına geldiğinde, Sovyetler Birliği'nin parçalanması nedeniyle, ekonomik bir kriz içine girildi. Zira proje, yıl bazında toplam 1340 insan-yıl'lık profesyonel insan gücünün katılımı ve yılda 750 milyon \$ mali destekle yürütülüyordu. Böylece, ITER projesi, nükleer füzyon enerjisinin bilimsel ve teknolojik fizibilitesini sergilemek üzere, kapsamlı fizik ve mühendislik araştırmalarının yapıldığı, dünyadaki ilk uluslararası deneysel füzyon reaktörü planlaması ünvanını aldı. Temmuz 1998'deki genel toplantıda, parasal olanaksızlıklar nedeniyle 1992'de, yani başlangıçta öngörülen teknik amaçlar

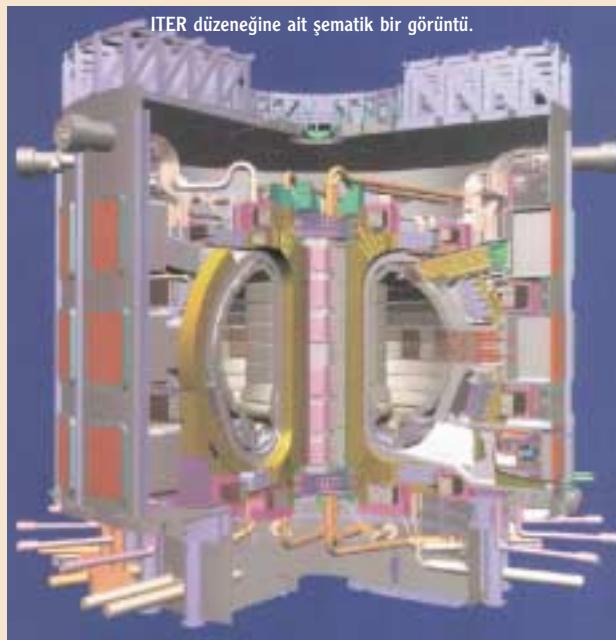
ve maliyetin küçültülmesi yönünde karar alınarak, yapım etkinlikleri bir süre ertelendi. Böylece, maliyetin yarı yarıya indirilmesi koşulunda yeni makinenin kapasite sınırları saptanarak, yeni teknik amaçlara hizmet edecek mühendislik çalışmalarının yapılması için, projenin EDA fazı 2001 Temmuzuna kadar uzatıldı. ITER-FEAT (Fusion Experimental Advanced Tokamak) olarak isimlendirilen yeni tasarımında üyeler, maliyetle ilgili tüm endüstriyel hesaplamaları ayrıntılı bir şekilde yaparak, projenin gerçekleşmesi ve performans optimizasyonu için gerekli adımları atacaklar. Bu aşamaları takiben, düzeneğin yapımının 8 yıl ve ilk deneysel aşamasında, sistemin trityumla aktiflenmesini önlemek için başlangıçta hidrojenle çalışıldıktan sonra, 5 yıl içinde, 500 MW'lık bir füzyon gücü elde etmeye olanak tanıyacak döteryum-trityum yakıtlı deneylere geçilmesi planlanıyor. Böylece, ITER-FEAT, deneysel bir füzyon reaktörü olarak, 500 MW düzeyinde termal enerji üreten ilk uluslararası füzyon düzeneği başarısını sergileyecek.



Temmuz 1998'de, ITER projesi üyeleri tarafından önerilen ve tekrar gözden geçirilecek olan performans özellikleri özetle şöyle öngörülmüştü:

- \* İndüktif akım sürme modunda,  $Q \geq 10$ , çalışma süresi 300-500 s ve füzyon reaksiyonu ürünü olan, 14 MeV'luk nötronların ortalama duvar yüklenmesinin  $\geq 0,5 \text{ MW} / \text{m}^2$  olması;
  - \* İndüktif olmayan akım sürme modundaysa,  $Q \geq 5$ . Burada amaç, sistemin devamlı şekilde çalışmasının sergilenmiş olması;
  - \* 1992-1998 yılları arasındaki EDA fazında geliştirilen vasıflı bileşenlerin, teknik, kavram ve çözümlerin, mümkün olduğunca yeni düzeneğe de kullanılması için, bugüne kadar geliştirilen tüm füzyon reaktör teknolojisi ve bileşenlerinin test edilerek yeni sisteme entegre edilmesi.
- Aşağıda, ITER-FEAT projesinde öngörülen bazı önemli plazma parametreleri görülebilir:

Toplam füzyon gücü $P_f$	500 MW
Füzyon gücü/yardımcı ısıtma gücü $Q$	$\geq 10$
Ortalama nötron duvar yüklenmesi	$0,57 \text{ MW}/\text{m}^2$
Plazmanın indüktif yanma zamanı	$\geq 300 \text{ sn}$
Plazmanın büyük yarıçapı $R$	6,2 m
Plazmanın küçük yarıçapı $r$	2,0 m
Plazma akımı $I_p$	17,4 MA
Toroidal manyetik alan $B_t$	5,3 Tesla
Plazma hacmi $V_p$	837 $\text{m}^3$
Yardımcı ısıtma+akım sürme gücü	75 MW



ITER düzeneğine ait şematik bir görüntü.

daysa  $A = 4$ 'tür. Büyük yarıçaptaki bu küçülme, tokamağın çalışma prensibi olan transformator özelliğinin değiştirilmesiyle sağlanıyor. En başta merkezdeki birinci sargının yarıçapı ve sırım sayısı çok küçültülerek ya da tamamen ortadan kaldırılarak, plazma toroidal akımını sürdürme işlevi bobinsiz, yani "indüktif olmayan" yöntemlerle gerçekleştiriliyor. Geleneksel tokamakların devasa boyutlara ulaşmasının nedeni, kap etrafına yerleştirilen ve sıcak plazmayı kabın ortasında

asılı tutarak soğumasını önlemek için kullanılan manyetik alan bobinleri. Şimdiyse, bunlar kaldırılarak, yerine merkezde çok küçük bir alan kaplayan ve üzerinden çok yüksek akımlar geçirilen, merkezi metal çubuklar kullanılıyor. Böylece, tor biçimindeki plazma kabı, merkezden ince bir akım çubuğunun geçtiği, küresel ve hatta silindirik bir geometriye dönüşmüş oluyor.

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TA-EK) Nükleer Füzyon Laboratuvarı'nda

geliştirilen, kurulan ve üzerinde 15 yıldan beri araştırma yapılan, çalışır durumdaki küresel tokamak STPC (Spherical Tokamak with Plasma Centerpost) makinesinde, 65 litre hacminde ve sekizgen-prizma biçiminde bir plazma kabın bulunuyor. Kabın üst ve alt yüzeylerine içeriden,  $90^\circ$ 'lik açılarda yerleştirilen dört çift elektrod sistemi kullanılarak yapılmış, tek-atımlı, yüksek güçlü bir dalga biçimlendirme hattıyla paralel şekilde birleştirilmiş üç manyetik sürmeli plazma topu ve yüksek güç

## Culham - MAST Küresel Tokamak Programı

Bu program, İngiltere Ticaret ve Endüstri Departmanı'yla Avrupa Atom Birliği EURATOM tarafından ortaklaşa destekleniyor. Çok başarılı olan START'tan sonra, daha yüksek performanslı MAST yüksek akımlı küresel tokamağı, Aralık 1999'da ilk deneme çalışmalarına başladı. MAST'ın belli başlı amaçları, yeni bir rejimde çalışarak, ileri tokamak rejimi saptandıktan sonra daha gelişmiş ITER tasarımına ışık tutmak ve füzyon reaktörü yolunda küresel tokamakların potansiyelini araştırmak. MAST'ın en önemli özellikleriyse, kompakt bir şekillenme elde etmek ve küresel tokamakların; boyut, akım ve darbe süresi gibi parametreleri açısından daha büyük ölçeklerdeki performansının test edilmesi. MAST'ın önemli plazma parametreleri şöyle: büyük yarıçap  $R = 0,7$  m; plazma yarıçapı  $a = 0,5$  m; görüntü oranı  $A \geq 1,3$ ; uzama katsayısı  $k \leq 3$ ; merkezi çubuk akımı  $I_{\text{çubuk}} \leq 2,2$  MA; toroidal plazma akımı  $I_p \leq 2$  MA; plazma hacmi  $V_p = 5$  m<sup>3</sup>; darbe süresi  $T = 1 - 5$  s; toroidal manyetik alan  $B_t \leq 0,63$  T ve ek ısıtma gücü  $P_{\text{ek}} = 6,5$  MW.

Mühendislik açısından, silindirik plazma kabı ya da diğer deyişle vakum odası, 2 m yarıçapında ve 4 m yüksekliğinde paslanmaz çelikten yapılmış ve üzerinde dairesel tanı amacıyla kullanılması düşünülen 92 adet penceresiyle birlikte, 25 ton ağırlığında. Plazmayı kontrol etmek ve şekillendirmek üzere 5 çift poloidal manyetik alan bobini bulunuyor. Bobinler su soğutmalı bakırdan sarılarak, cam epoksi resin ile izole edildikten sonra, vakumun kirlenmesini önlemek için, paslanmaz çelik kılıflar içine yerleştiriliyor. Düzenegin en önemli bileşeni durumunda olan ve üzerinden yüksek akımların geçtiği merkezi çubuk, bakır iletken takozlarla dıştan akım devresini tamamlayan kısımlara bağlanarak tek bir sistem sayesinde soğutuluyor. Takozların ve merkezi çubuğun uçları, kayan bağlantılı bir köprüle birleştiriliyor. Merkezi çubuğu oluşturan 24

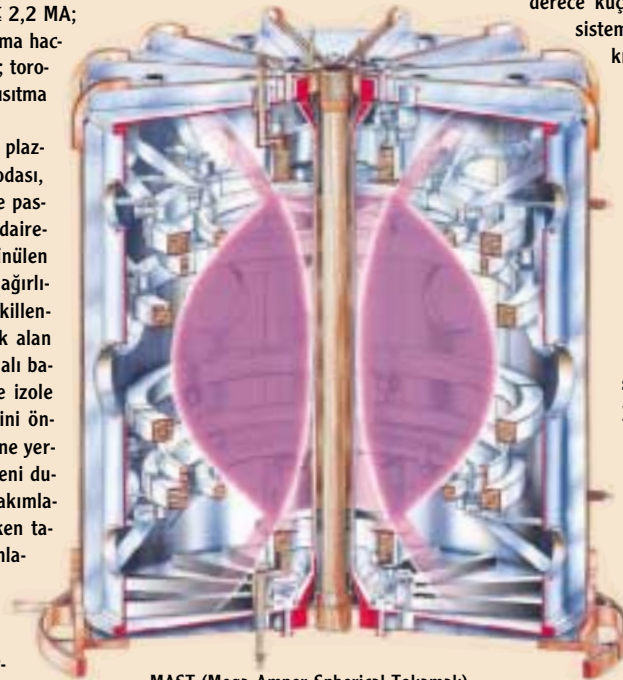


Hızlı fotoğraf tekniğiyle saptanmış 1 MA'lık tokamak şekillenmesi.



iletim hattının arası da epoksi resinle dolduruluyor. Çubukta oluşacak kısılmaları önlemek için, paslanmaz çelikten üç kenetleyici kullanılıyor ve yatay birimlerle bağlantılar da kayan esnek bileşenlerle sağlanıyor. Merkezi çubuğun üzerine, dört tabaka halinde, merkezi primer bobini sarılır. Bobin ile merkezi çubuk arasında, etkin bir elektrik yalıtımı temin edilerek, karbon fiber uçlar kuvvetli bir çembere alınıyor. Plazma akımının sürdürülmesi ve plazmanın ısıtılması için Nötrül Demet Enjeksiyonu (NBI) ve Elektron Siklotron Rezonans Isıtması (ECRH) yöntemleri kullanılıyor. Güç kaynakları olarak, Culham'da halen çalışmakta olan COMPASS tokamağıyla ortaklaşa kullanılmak suretiyle, sistemin maliyeti son derece küçük tutuluyor. Dolaşım ve anahtarlama sisteminin bakım işleri dahil, bir hafta gibi kısa bir sürede, iki makine arasındaki paylaşım sağlanabiliyor. İleride, yeni bir kondansatör bataryası ve diyot/thyristor anahtarlama modülüyle, poloidal manyetik alan bobinleri beslenecek, toroidal manyetik alan sistemindeyse 25 MW'lık 450 V, 92 A'lık AC/DC dönüştürücüler kullanılacak. MAST'ın saptırıcılarına ve merkezi çubuğuna sistemdeki kirlenmeyi asgariye indirmek üzere döşenmiş bulunan grafit tuğlalarına gömülmüş 570 elektriksel sonda, ve vakum odasının değişik yerlerindeki 50 MHz'lik kızılötesi kameralarla, saptırıcı ve kap duvarlarındaki güç yüklenmeleri de ölçülebiliyor.

Sisteme ilk adımda ORNL'dan sağlanan, 500 MW'lık NBI sistemi uygulanarak, Mayıs ve Haziran 2000'de 500 kA'lık ve 1 MA'lık yüksek performanslı H-modu elde edildi. Bunun kısa zamanda, tasarım hedefi olan 2 MA'lık yüksek performanslı bir plazma akımı oluşturması amaçlanıyor.



MAST (Mega Amper Spherical Tokamak) makinesinin şeması



# PPPL - NSTX Küresel Tokamak Programı

Amerika'nın ulusal küresel tokamak deneysel NSTX programı, Japon asıllı olup Amerika'da yerleşmiş olan, Y.K.M. Peng ve M. Ono başkanlığında yürütülüyor. Programda, başta PPPL olmak üzere, Amerika'nın çeşitli üniversiteleri ve araştırma merkezlerinden bilim adamlarının yanı sıra, 8 Japon misafir araştırmacıyla birlikte, toplam 75 bilim adamı görev alıyor. Hemen hemen MAST ile aynı fiziksel boyutlara sahip olan NSTX düzeneğinin ana görevi, çok yüksek  $\beta$  toroidal beta, MA'ler düzeyinde plazma akımları, küçük, hemen hemen 1'e yaklaşan A görüntü oranı, yüksek t sıcak koruma zamanı ve büyük bir k uzama katsayısı elde edilerek, füzyon reaktörü koşulluna yakın, ileri küresel tokamak rejimine ulaşmak. Bu rejim, reaktör boyutlarını minimize ederek çok ekonomik ve kompakt bir füzyon reaktörü geliştirmek açısından son derece önemli. NSTX'in amacıysa, küresel tokamak kavramını, füzyon fiziği esaslarına dayandırmak ve endüktif olmayan (merkezi primer bobinsiz) plazma akımı sürme mekanizmasını sergilemek.

NSTX düzeneği tasarlanırken şu özellikler dikkate alındı:

\* Plazmayı başlatmak için kullanılan, eş-eksenli CHI enjektörü (coaxial helicity injector) dahil, merkezi çubuğun yarıçapının olabildiğince küçük tutulması ve görüntü oranının  $A = 1,26$ 'ya kadar küçültülmesi;

\* Alçak Coulomb çarpışmalı bir yoğunlukta, MA'lik yüksek plazma akımları elde edilmesi;

\* Plazma kararsızlıklarından kaynaklanan b sınırlamalarını önlemek üzere, plazma kabı içinde pasif iletken duvarların kullanılması;

\* Uygun yüksek frekans ısıtması ve uzun süreli plazma akımı sürme yöntemleriyle, radyal akım ve sıcaklık profil kontrollerinin sağlanması.

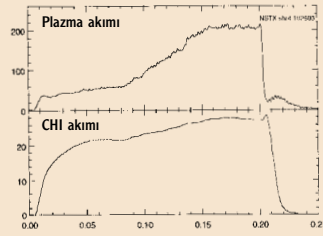
NSTX düzeneğinde, üç yıllık titiz tasarım ve kurulum aşamasından sonra, 12 Şubat 1999 günü saat 16.06'da ilk küresel plazma, PPPL kontrol odasında ayarlanan bilgisayar ekranlarında parladı. Bu başarı, TFTR'in 1997'deki düzleşme çıkışı, yani  $Q = 1$ 'lik başarısından sonra, PPPL'de ikinci başarı olarak, NSTX makinesiyle "laboratuvarda yeniden bir yıldız yaratılması" şeklindeki yorumlarla sevinç yarattı. PPPL direktörü R. Goldston'un yorumuysa "NSTX'in bu sonucu sadece PPPL'de değil, aynı zamanda bütün ABD ve hatta bütün dünya füzyon programlarında çığır açmış bulunuyor ve füzyon dünyası yeni bir döneme giriyor" şeklindeydi. 15 Şu-

bat 1999 günü 350 kA'lık plazma akımı sağlandı. Düzeneğin yeteneği artırılarak, 16 Aralık 1999'da plazma akımı, 1 MA'lik tasarım düzeyine ulaştı. Bu yüksek akım başarısının anahtarı, radyal ve enine kontrol sistemlerinin devreye sokulmasıdır. Planlanan plazma şekillenme parametresi  $k = 1,6 - 2,2$  aralığında gerçekleşti. İlk plazma şekillenmesi, tokamaklarda kullanılan merkezi primer bobini yerine, merkezi çubukla aynı ekseninde bir plazma enjektörü (CHI) kullanılarak gerçekleştirildi. Başlangıçta, örneğin, 27 kA'lık CHI akımıyla, on katı daha büyük 260 kA'lık toroidal plazma akımı, herhangi bir merkezi primer bobini kullanılmaksızın elde edildi. Bu gerçekten büyük başarıydı.

NSTX sisteminin en kritik bileşeni merkezi çubuk, kurulum, tamir, bakım ve ileride yapılması gereken güncelleştirme işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla, sökülebilecek şekilde planlandı. Merkezi çubuk, seramik yalıtıcılarla dış kapta yapılarak, plazmayla doğrudan teması kesmek için, içinde 200 duyarlı eleman bulunan, grafit tuğlalarla kaplandı. Ayrıca, NSTX'de oluşan hidromanyetik kararsızlıkları önlemek üzere, plazma kabı 1,2 cm kalınlıkta pasif bakır düzlemlerle donatıldı. Sistemin daha ekonomik hale gelmesi için, PPPL'deki TFTR tokamağının birçok bileşeni, olduğu gibi kullanıldı. Yüksek yoğunluklardaki, yüksek frekans ısıtmalarına uygun olan ve elektron siklotron frekansı yüksek harmoniklerinin HHFW (High Harmonic Fast Wave) 2,3



NSTX küresel tokamak düzeneğinden genel bir görünüm.



CHI plazma enjeksiyonu sırasında oluşan akım halkaları (solda). 260 kA'lık toroidal akım, 27 kA'lık CHI akımının 10 katı düzeyinde (sağda).

4 MW gücündeki hızlı dalga ile,  $3,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  lük merkez yoğunluğundaki plazma elektronları 400-900 eV'a kadar ısıtıldı. Eylül 2000'de, NBI sistemi de çalışmaya başladı. İlk sonuçlar, 2,8 MW'lık iki iyon kaynağıyla alınarak  $\beta = 0,18$  düzeyine ulaştı ve 90 kJ'lük toplam birikmiş plazma enerjisiyle, plazma akımı 1,1 MA'ken çok başarılı bir ısınma gerçekleşti.

2001 yılında NBI ve HHFW'in tam güç kapasiteleri kullanılarak, 2002 yılında CHI'nin endüktif olmayan kapasitesi 500 kA'e yükseltilecek. 2004 yılındaysa, daha ileri küresel tokamak rejimleri incelenerek plazmanın aktif akım/basınç profil denetimi ve aktif duvar modu stabilizasyonu,  $\beta = 0,40$ , % 70'lik akım sürmesi ve saniyeler düzeyinde yüksek koruma zamanıyla, NSTX'de, çok ilginç füzyon reaktörü ya da hacimli nötron kaynağı olanakları elde edilmiş olacak.

lü bir de plazma enjektörü var. Sözü edilen sistemde oluşturulan plazma kuşakları yardımıyla, A değeri düşük (1.2 - 1.7) küresel tokamak plazması şekilleniyor. Bu şekillenen küresel tokamakda plazma akımı, toroidal ve bobinsiz elde edilen poloidal alanlarla plazma kabının merkezine doğru Lorentz kuvvetiyle itilmesi sonucu, plazma kuşaklarının kendi kendilerini biçimlendirmesiyle (self organization process) oluşuyor. Böylece, dünyadaki emsallerinden daha farklı şekilde geliş-

tirilmiş olan STPC makinesinde, küresel tokamak şekillenmesinin temel topolojisi de irdelenmiş oluyor.

Anılan bu farklı küresel tokamağa ait iki makale, 12-16 Haziran 2000'de Budapeşte'de, Avrupa Fizik Derneği (EPS) tarafından düzenlenen 27. Kontrollü Füzyon ve Plazma Fiziği Konferansı ve 4-10 Ekim 2000'de IAEA tarafından Sorrento'da düzenlenen 18. Füzyon Enerjisi Konferansı'nda, "özgün kavramlar (innovative concepts)" oturumlarında sunulurken tartışıldı. Ma-

kaleler, şu sıralarda EPS ve IAEA tarafından hazırlanmakta olan konferans CD'lerinde basılmakta.

Boyutlarının küçültülüp basitleştirilerek, çok daha ekonomik hale gelmiş, ve böylece bakımlarının da kolaylaşmış olması gibi avantajların yanı sıra, diğer birçok avantajlı özelliği de bünyesinde barındıran iyi korunmuş, kararlı bir tokamak şekillenmesi olmaları, bilim adamlarının küresel tokamak düzeneklerine son yıllarda oldukça artan ilgilerinin nedeni. Dünyada halen çalışmak-

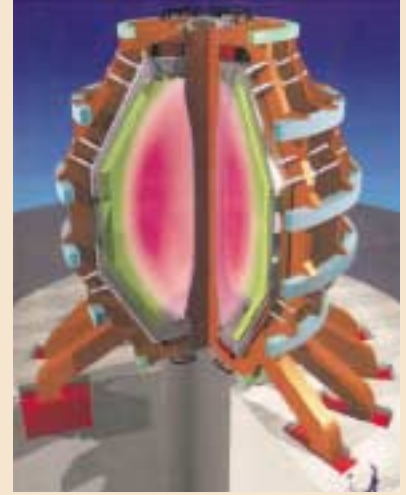
ta olan küçük ölçekli küresel tokamakların en önemlisi, İngiltere’de Culham Araştırma Merkezi’ndeki START (Small Tigth Aspect Ratio Tokamak) makinesi.

1990’larda çalışmaya başlayan START’ın plazma kabı, 1 m yarıçaplı, 2 m yükseklikte bir silindir biçiminde. START’ta ulaşılan başarılı deneysel korunma zamanı üzerine, çeşitli ülkelerde, START’tan iki misli büyük ve merkezi çubuklarından milyon amperler düzeyinde akıların geçebileceği, birkaç orta ölçekli tokamak kurulmaya başlandı. Bunlara örnek olarak, İngiltere-Culham’da MAST (Mega Amper Spherical Tokamak), Amerika-PPPL’de NSTX (National Spherical Tokamak Experiment), Japonya-Tokyo’da TS-4, Rusya Federasyonu-Ioffe’de Globus-M ve Brezilya’da ETE gibi orta ölçekli küresel tokamak makineleri gösterilebilir. Türkiye’deyse, halen çalışmakta olan küçük ölçekli STPC küresel tokamak makinesinin, orta ölçeğe kadar büyütülmesi için, üst düzeyde birçok girişim yapılmış olmasına karşın, bugüne kadar sorumlu mercilerden, ciddi program içeren bir destek, hatta kayda değer bir ilgi bile görülmemiş durumda. Yaklaşık on yıldır, sadece IAEA tarafından yıllık 4000 dolarlık kontratlarla desteklenen proje, şu anda ülkemizin belirli bir programa oturmuş füzyon araştırma örgütlenmesi bulunmaması nedeniyle, IAEA önderliğindeki orta ve büyük ölçekli küresel tokamak koordineli araştırma programı şemsiyesi altına da girememiş durumda. Halen, Culham-MAST ve PPPL-NSTX deneyleri başarıyla çalışıyor. Temmuz 2000’de IAEA tarafından düzenlenen “Sürekli manyetik füzyon makineleri” konulu teknik komite toplantısında sunulan bir çalışmada, Culham grubu, füzyon reaktörü için gerekli ekonomik ve teknolo-

## Culham-SSPP

SSPP, ekonomik bir füzyon reaktörü olarak, küresel tokamakların fizibilitesini sergileyen kavramsal bir tasarım. Özellikleri; küçük A, büyük k ve yüksek bt koşullarında stabil şekilde çalışması, merkezi çubuğun, basit bir montajla, bakım ve güncelleştirme işlemlerine uygun olması ve yüksek oranda akım sürülebilmesi. Battaniye modüllerinin, merkezden dış yüzeylere kaydırılmasıyla basit bir bakım sağlanabiliyor. Yüksek termal etkinlik için, helyum soğutmalı özel bir yatak kullanılıyor. Önerilen 3300 MW gücündeki bu füzyon reaktörünün belli başlı parametreleriyse şu şekilde öngörü-  
lüyor:  $R = 3,4$  m;  $a = 2,4$  m;  $A = 1,4$ ;  $k = 3$ ;  $I_{cubuk} = 31$  MA;  $I_p = 31$  MA;  $T = 19,2$  keV;  $b_t = 0,2$ ;  $t = 2$  s;  $P_f = 3300$  MW; net elektrik gücü  $P_{net} = 1200$  MW; nötron duvar yüklenmesi  $3,6$  MW/m<sup>2</sup>; yakıt yoğunluğu  $1,1 \times 10^{20}$  m-3; ve trityum doğurma oranı 1,14.

SSPP kavramsal küresel tokamak reaktöründe, MAST’ta kullanılan güç kaynakları, link, anahtarlar ve geri besleme sistemleri aynen



Sürekli şekilde çalışan büyük ölçekli SSPP küresel tokamak kavramsal tasarım şeması.

kullanılarak maliyet yarı yarıya düşürülecek, nihai tasarım da ekonomik hale getirilmiş olacak.

şik koşullarda, küresel tokamakların da sürekli olarak çalışmasıyla ilgili, SSPP (Steady State Power Plant= Sürekli güç reaktörü) başlığı altında, kavramsal bir füzyon reaktör tasarımı önerdi.

Tokamak düzeneklerinde, 1970’den bugüne kadar 30 yıllık ilerlemeleri bir tablo halinde göstermek mümkün.

Tablodan da anlaşılacağı gibi, yıllar geçtikçe tokamak fiziği ve buna bağlı olarak füzyon reaktörü sorunlarının büyük ölçüde üstesinden gelinmiş durumda.

Özetle; enerji uzmanları, mevcut enerji krizinin, ancak füzyon reaktörlerinin devreye girmesiyle atlatılabileceğini düşünüyorlar. Bir enerji kaynağı olarak, şu anda gelişme aşamasındaki füzyon enerjisinin çekiciliği, çevre ve radyoaktif atıklar açısından temiz, yakıt bolluğu açısından da tükenmez olmasından kaynaklanıyor. Üzerinde çalışı-

lan alternatif birkaç füzyon reaktörü arasında en güvenilir, umut verici olanı, sorunlarının çoğu çözülmüş, geri kalanın sorunlarının da çözüm yöntemleri saptanmış olan reaktör adayı tokamaktır. Tokamakta, en önemli km taşı olan  $Q = 1$  noktası aşılmış ve uluslararası ilk deneysel füzyon reaktörünün tasarım ve mühendislik çalışmaları tamamlanmış bulunuyor. Reaktörün kurulma aşamasında, boyutların ve dolayısıyla maliyetin daha ekonomik hale getirilmesi amacıyla dünyadaki endüstri ve mali kapasite tekrar gözden geçirilecek, muhtemelen 8 yıl içinde ITER-FEAT uluslararası reaktörü kurularak, 5-6 yıllık ön deneylerden sonra en çok 15 yıl içinde 500 MW gücünde füzyon enerjisi üretilecek.

Tokamağı daha kompakt ve ekonomik hale getirmek için, başta Amerika ve İngiltere’dekiler olmak üzere, dünyanın bazı laboratuvarlarında ulusal küresel tokamak çalışmalarına başlanmış ve çok başarılı sonuçlar alınmış, kapasite iki misli artırılarak, orta ölçekli MAST ve NSTX küresel tokamaklarında saniyeler süren MA’lik plazma akımları elde edilmiş durumda. Kısa sürede elde edilen bu başarıya dayanarak SSPP gibi sürekli çalışan, tahminen 5 - 10 yıl içinde 1200 MW gücünde elektrik üretebilecek olan bir küresel tokamak reaktörün tasarımı da yapıldı.

Tablo: Tokamak Fiziği Problemlerinin Zamanla Çözüm Evrimi

Problemler	1970 yılı	1995 yılı	2000 yılı
Denge	?	√√	√√
Hidromanyetik kararlılık	?	√√	√√
Enerji ve tanecik aktarımı	?	√	√√
Helyum ve kirlilik kontrolü	??	√	√√
Plazma ısıtması	??	√√	√√
Endüktif olmayan akım sürmesi	??	√√	√√
a tanecikleriyle ısıtma	??	?	√
Sürekli çalışma	??	?	√
Düşük aktiflenme malzemeleri	??	?	√
İleri tokamak reaktör optimizasyonu	?	?	√

Burada, Çözülmemiş (??), Az çözülmüş (?), Yöntemi saptanmış (√) ve Çözülmüş (√√)

\* TAEK Nükleer Füzyon Laboratuvarı