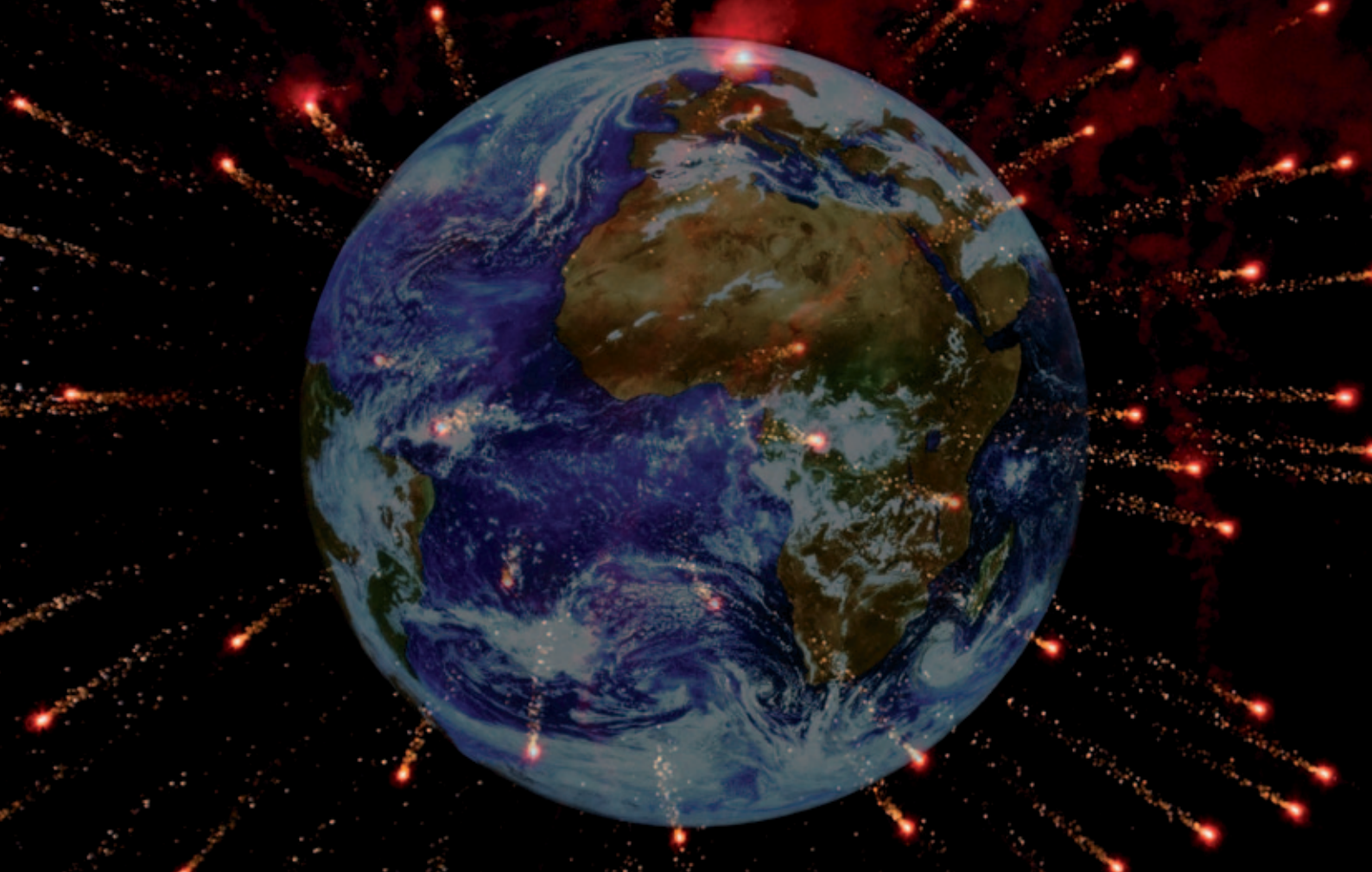


Nötrino salınımları
OPERA deneyinde ilk kez
doğrudan gözlemlendi!

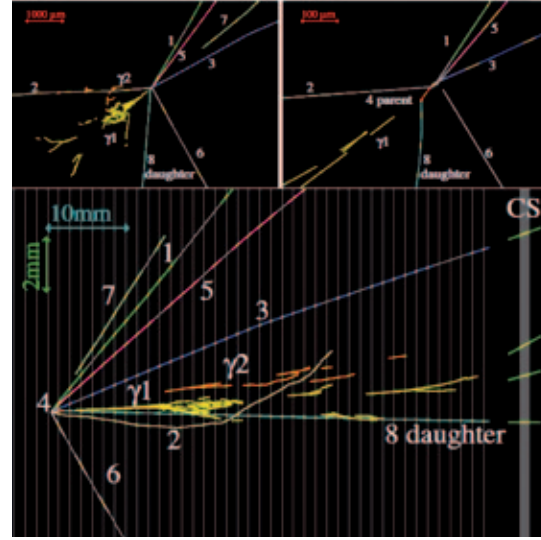
Bukalemun Parçacık Nötrino



Doğadaki en renkli sürüngenlerden biri şüphesiz bukalemundur. Bu sürüngen ortama göre renkten renge girebilen bir kamuflaj ustasıdır adeta. Atomaltı parçacıklar arasında, bukalemun gibi davranan bir parçacık olduğuna dair ilk ipucu 1998 yılında bulunmuştu. Nötrino adındaki bu parçacığın metamorfoza uğrayabildiğine dair en güvenilir sonuç geçtiğimiz ay OPERA ekibi tarafından ilan edildi. Bu keşif var olan kuramsal bilginin ötesinde, yeni fiziğe açılan ilk pencere olarak kabul ediliyor.

Evreni yoğun bir şekilde dolduran nötrinin sırrını çözebilmek için yarım yüzyılı aşkın bir süredir bilim insanları büyük uğraşlar veriyor. Nötrinoyu fizik dünyasına ilk olarak Avusturyalı fizikçi Wolfgang Pauli kazandırdı. Pauli beta bozunmasında ortaya çıkan protonun ve pozitronun yanında yüksüz küçük kütleli bir parçacığın daha olması gerektiğini 1930 yılında ileri sürdü, hatta nötrinoyu tarif ettikten sonra şöyle söyledi: "Öyle bir parçacığın var olduğunu ileri sürdüm ki belki hiç keşfedilemeyecek!". Pauli, bu son cümlesi hariç söylediklerinde haklı çıktı. Bu tezinden 26 yıl sonra, yani 1956 yılında, Clyde L. Cowan ve Frederick Reines nötrino-madde etkileşimlerini ilk kez gözlemledi ve böylece nötrinin varlığı kanıtlanmış oldu. Sonraki araştırmalar doğada üç çeşit nötrino olduğunu gösterdi: Elektron nötrino, müon nötrino ve tau nötrino. Nötrinin keşfinden sonra yapılan çalışmalar, nötrinin sırlarını çözerek mevcut kuramsal bilgilerin sınanmasına yöneldi. Özellikle Güneş'ten gelen nötrinolarla yapılan çalışmalar, nötrinin diğer atomaltı parçacıklardan farklı birtakım özelliklere sahip olabileceğini gösterdi. Güneş'teki nükleer füzyondan dolayı her hidrojen yanması sonucunda iki nötrino açığa çıkar. Adeta görünmez bir sağanak yağmur gibi saniyede trilyonlarca nötrino vücudumuza girer ve çıkar. Nötrinolar çok zayıf etkileştikleri için bu nötrino yağmurunun bize hiç bir zararı yoktur. Güneş'ten gelen bu kadar çok nötrinin sayısını ölçmeye yönelik ilk çalışmalar Raymond Da-

vis ve ekibi tarafından yapıldı. 1960'lı yıllarda başlayan bu çalışmalarda, Güneş'ten gelen nötrinoların sayısının tahmin edilenden daha az olduğu görüldü. Bu durum akla şu üç olasılığı getirdi: Ya bilim insanları yanlış ölçümler yapıyordu ya da yapılan kuramsal hesaplar yanlıştı. Son ihtimal ise nötrinin Güneş'te oluştuktan sonra bilmediğimiz bir etkileşim yaparak farklılaşıyor olabileceğiydi. İhtimaller arasında yer alan, kuramsal hesapların yanlış olma olasılığı hayli düşüktü, çünkü mevcut modelin birçok öngörüsü doğrulanmış ve hayli başarılı sonuçlar elde edilmişti. Bilim insanlarının yanlış ölçümler yapma ihtimali ise tabii vardı. Fakat benzer ölçümler farklı teknikler kullanılarak birçok kez yapıldı ve elde edilen sonuçların hepsi aynı probleme işaret ediyordu, yani Güneş'ten gelen nötrinoların sadece % 40'ı Dünya'ya ulaşabiliyordu. Solar nötrino problemi olarak literatüre geçen bu problemin çözümü için kuramsal birtakım modeller üretildi. Bunlardan en ilgi çekici olanı İtalyan fizikçi Bruno Pontecorvo tarafından 1957 yılında daha solar nötrino problemi bile bilinmezken ortaya atılmıştı. Pontecorvo, nötrinin salınım yaparak karşı-nötrinoya (nöt-



Tau nötrino etkileşiminde oluşan yüklü parçacıkların fotoğrafik emülsiyon film içinde bıraktığı izler

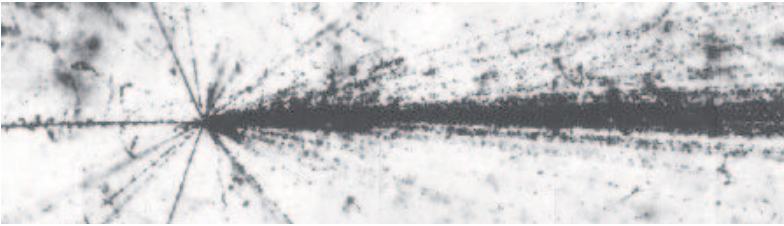
Sağ üst resim: Tau lepton ("Parent") yüklü bir parçacığa bozunuyor (8 nolu iz). Bu bozunum tau nötrino madde etkileşiminin imzası.

rinonun karşı parçacığı) dönüşebileceğini ileri sürdü. 1962 yılında ise Japon fizikçi Ziro Maki bir nötrinin başka bir nötrinoya, örneğin elektron nötrinin müon nötrinoya veya tau nötrinoya salınım yaparak dönüşebileceği fikrini ortaya attı. Dolayısıyla, nötrino salınım yapıyorsa elektron nötrinin bir kısmı doğduğu noktadan Dünya'ya gelene kadar metamorfoza uğrayıp başka bir nötrinoya dönüşüyor, bu farklılaşmadan dolayı elektron nötrino sayısında bir azalma meydana geliyor. Bu olayın doğruluğuna dair ilk ipucu 1998 yılında Süper Kamiokande deneyinde bulundu. Nötrinoların salınım yaptığı dolaylı bir şekilde de olsa gözlemlendi. Takip eden yıllarda yapılan deney-

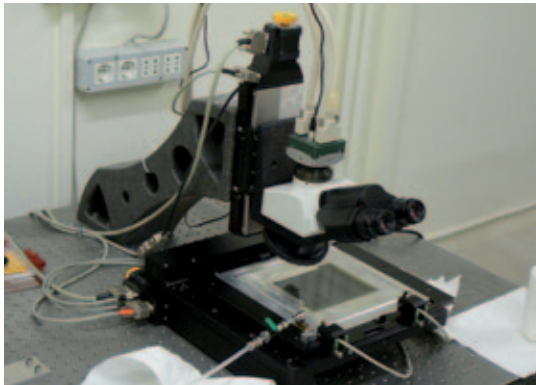


Gran Sasso yeraltı laboratuvarına yerleştirilen OPERA adlı algılayıcı. 10 metre yüksekliğinde ve 20 metre uzunluğundaki OPERA algılayıcısı 4000 ton ağırlığında.

ler de Süper Kamiokande'yi doğruladı. Fakat bu gözlemlerin doğruluğundan emin olabilmenin tek yolu nötrinin salınım sonrası halinin fotoğrafının elde edilmesiyle mümkün olabilirdi. Örneğin hızlandırıcılar kullanılarak oluşturulan müon nötrino, salınım yaparak diyelim ki tau nötrinoya dönüştü; eğer tau nötrinoyu fotoğraflayabilirsek salınımın gerçekleştiğinden % 100 emin olabiliriz. Bunu yapabilmek için kullanacağımız algılayıcılar hem müon nötrinoya hem de tau nötrinoya duyarlı olmalıdır. Böyle bir algılayıcı İtalya'daki Gran Sasso yeraltı laboratuvarında kuruldu. OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) adı verilen ve müon nötrininin tau nötrinoya salınımını gözlemlemek için tasarlanan bu algılayıcının yapımında 12 ülkeden yaklaşık 170 bilim insanı görev aldı. Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden de bir ekibin katıldığı bu projede algılayıcının yapımı 2008 yılında tamamlandı. Deneyde kullanılan nötri-



OPERA deneyinde fotoğrafik emülsiyon filmleri analiz etmek için kullanılan otomatik mikroskop sistemi ve fotoğrafik emülsiyonda oluşan bir etkileşimin görüntüsü



no demeti ise Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) üretiliyor. CERN-SPS hızlandırıcısında, hızlandırılan protonların bir hedefe çarpıtılması sonucu oluşan pion ve kaon gibi parçacıkların bozunumlarından müon nötrino açığa çıkmaktadır. Yüksüz olduğu için elektromanyetik etkileşim yapmayan nötrino, yörüngesinde herhangi bir sapma olmadan Alpler'i aşarak İtalya'daki Gran Sasso laboratuvarına ulaşıyor. Işık hızına yakın bir hızda hareket eden nötrino 732 km'lik bu yolcuğu 2,4 milisaniyede tamamlıyor. OPERA ekibi, algılayıcıya çarpan bu nötrinoların etkileşimlerini analiz etmek için 2 yıldır yoğun olarak çalışıyordu. Bu uğraş ilk meyvesini 2010 yılında verdi. CERN'den yollanan trilyonlarca müon nötrinodan birinin bu yolculuk esnasında tau nötrinoya dönüştüğü ilk kez doğrudan gözlemlendi.

OPERA algılayıcısı: Ağır ama hassas

Nötrinoyu diğer atomaltı parçacıklardan farklı kılan en önemli özellik kütesinin çok küçük olmasıdır. Nötrininin kütesini ölçmek için tasarlanan deneyler sadece üst limit koyabiliyor. Örneğin, yapılan ölçümlere göre elektron nötrino, elektrondan en az 230.000 kez daha hafiftir. Nötrininin küçük kütleli olmasının yanında nötr bir lepton olması, sadece zayıf kuvvet yoluyla etkileşmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla nötrino madde ile çok az etkileşir. Nötrininin neden az etkileşen bir parçacık olduğunu anlamak için şu kıyaslamayı yapmak kanımca yeterli olacaktır. Güneşte oluşan bir nötrino su içerisinde etkileşim yapmadan yaklaşık 20 trilyon metre (Dünya ile Güneş arasındaki mesafenin 1300 katı kadar) yol kat edebilir. Bu mesafe nötrino gibi yüksüz olan nötron için ise 4 metre kadardır. Bu özelliği ile adeta hayaleti andıran nötrinoyu tespit etmenin yolu büyük ve hassas algılayıcılar kullanmaktır. Örneğin nötrino madde etkileşimlerini araştırmak için tasarlanan Japonya'daki Süper Kamiokande algılayıcısı 50.000 tonluk ağırlığı ile algılayıcılar arasındaki ağırlık rekorunu elinde tutmaktadır. Bu ağırlığı ile Süper Kamiokande algılayıcısı CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'na yerleştirilen 4 algılayıcının (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) ağırlıklarının toplamından daha ağırdır. Bu ağırlığın yanı sıra algılayıcının yüksek hassasiyetle ölçüm yapması gerekmektedir. Bu iki önemli özellik düşünülerek kurulan OPERA algılayıcısı, ağır kütesinin yanı sıra milimetrenin binde biri mertebesinde hassas ölçümler yapabilecek kapasitededir. OPERA algılayıcı *Emulsion Cloud Chamber* (ECC) ve elektronik dedektörlerden meydana gelmiştir. Algılayıcının kalbi konumundaki ECC birim, 56 kurşun plaka ve 57 fotoğrafik emülsiyondan oluş-

maktadır. Kurşun plakaların arasına fotoğrafik emülsiyon filmlerin yerleştirilmesiyle oluşan bu sandviç yapının yüzey alanı $10,2 \times 12,7 \text{ cm}^2$ ve kalınlığı $7,5 \text{ cm}$ 'dir. Bu ECC birim içindeki, fotoğrafik emülsiyon film, nötrino etkileşimlerinden oluşan yüklü parçacıkların izlediği yolu fotoğraflayarak, etkileşimlerin 3 boyutlu görüntüsünün mikrometre hassasiyetinde elde edilmesini sağlar. Bu özelliği ile fotoğrafik emülsiyon çok kısa ömürlü parçacıkların oluşum ve bozunum notlarının tespiti için çok kullanışlı bir algılayıcıdır. Fakat fotoğrafik emülsiyon filmin kaydettiği üç boyutlu görüntü gözle görülemeyecek kadar küçük olduğundan, görüntü ancak optik mikroskop yardımıyla analiz edilebilmektedir. Dolayısıyla emülsiyon filmde kaydedilen görüntünün analiz edilebilmesi için öncelikle filmlerin fotoğraf filmleri gibi banyolanıp kurutulması, sonrasında da optik mikroskop altında incelenmesi gerekir. Bu özelliği ile elektronik algılayıcılardan farklı olan fotoğrafik emülsiyon, özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra kozmik parçacıklarla yapılan çalışmalarda yoğun bir şekilde kullanıldı. 1960'lı yıllardan sonra bu teknik yerini elektronik algılayıcılara bıraktı. Fakat son yıllarda, nötrino fiziği çalışmalarında fotoğrafik emülsiyon tekrar tercih edilen bir algılayıcı haline geldi. Bunun en önemli sebebi fotoğrafik emülsiyon filmlerdeki görüntüleri analiz etmek için kullanılan optik mikroskop sistemlerinin otomatikleştirilmesidir. Bu sayede kısa sürede geniş yüzeyler taranarak çok sayıda etkileşim analiz edilebilmektedir. Örneğin OPERA deneyinde geliştirilen otomatik mikroskop sistemi saatte 1 m^2 alanı tarayacak hıza ulaşmıştır. Bu kadar alanı "elle" taramaya kalksak aylar süren bir çaba gerekir.

Yukarıda bahsettiğimiz gibi nötrino çok ender etkileşim yapan bir parçacık olduğu için kısa sürede çok sayıda etkileşim gözlemlenmenin yolu algılayıcının kütlesinin ağır olmasından geçer. Bu ağırlığı OPERA'da ECC birim içindeki kurşun plakalar oluşturuyor. İki yıl içerisinde her birinin ağırlığı $8,3 \text{ kg}$ olan ECC birimlerden 150.000 adet üretildi. Otomatik robot kollarla üretilen ECC birimler yine otomatik robot kollar vasıtasıyla OPERA algılayıcısına yerleştirildi. Her biri $6,7 \times 67 \text{ m}^2$ büyüklüğünde, ardışık 62 duvar görünümünde olan ECC hedef bölgesi, CERN'den Gran Sasso'ya ulaşan nötrinolar için hem bir hedef hem de hassas bir algılayıcı işlevini yerine getirmektedir. Her ne kadar çok yönlü bir algılayıcı işlevini yerine getirirse de ECC'nin elektronik algılayıcılarla da desteklenmesi gerekir. Elektronik algılayıcılar analiz sürecini hızlandırdığı gibi ECC içerisinde gerçekleşen nötrino madde etkileşimlerinin CERN'den gelen nötrinolarla oluşup oluşmadığını anlamamıza imkân vermektedir. OPERA deneyinde elektronik algılayıcı olarak iz

dedektörleri ve müon spektrometresi kullanıldı. Her ECC duvarının arkasına fiberden oluşturulmuş bir iz dedektörü yerleştirilerek, nötrino etkileşiminde ortaya çıkan elektrik yüklü parçacıkların izleri tespit ediliyor. Bu izler kullanılarak etkileşimin gerçekleştiği ECC birim bulunup, bir robot kol yardımıyla bulunduğu yerden çıkarılıyor. Bundan sonraki aşama fotoğraf makinesinden çıkarılan negatif filmin banyo edilip fotoğraf baskısının oluşturulmasına benziyor. ECC birim karanlık odada açılıp kurşun plakalar fotoğrafik emülsiyon filmlerden ayrılıyor. Birtakım kimyasal işlemlerden sonra fotoğrafik emülsiyon film içinde elektrik yüklü parçacıkların izleri oluşturuluyor. Fakat yukarıda da bahsettiğimiz gibi bu izler gözle görülecek kadar büyük olmadığından, izlerin görüntülenmesi bilgisayar kontrollü optik mikroskoplar yardımıyla mümkün oluyor. Bu işlem için hem Avrupa'da hem de Japonya'da geliştirilen otomatik tarama sistemlerini kullanıyoruz. Otomatik tarama mikroskobunun bulunduğu nötrino etkileşim noktası analiz edilerek bu etkileşimin bir tau nötrino etkileşimi olup olmadığını anlamaya çalışıyoruz. Şayet bu etkileşim tau nötrinodan kaynaklanıyorsa etkileşim sonucunda tau lepton diye adlandırdığımız negatif yüklü bir parçacığın açığa çıkması gerekir. Kararlı olmayan bu parçacık ortalama 1 mm yol kat ettikten sonra başka parçacıklara bozunur. Bu bozunma noktasını bulabilirsek etkileşimin tau nötrino tarafından yapıldığını tespit edebiliriz. Bu iki yıllık süreçte OPERA ekibi ECC birim içinde yaklaşık 1000 nötrino etkileşimi buldu. Yapılan detaylı analizler sonucunda bunlardan birinin tau nötrino etkileşimi olduğu gözlemlendi. OPERA deneyinde üç yıl içerisinde bu etkileşim gibi $10-15$ etkileşim daha bulunmasını bekliyoruz. Bunların da bulunmasıyla OPERA deneyi, yarım yüzyılı aşkın bir süredir bilim gündemini meşgul eden önemli problemlerden birini çözerek bilim tarihine geçmiş olacak. Bu önemli buluş, bu bukalemun parçacığın gizemini büyük ölçüde çözmüş olsa da, onunla ilgili araştırmalar hız kesmeden devam edecek.



Doç. Dr. Ali Murat Güler lisans (1994) ve yüksek lisans (1997) eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde tamamladı. Doktora (2000) çalışmasını TÜBİTAK bursu ile CHORUS deneyinde yaptıktan sonra Nagoya Üniversitesi'nde (2000-2002) nötrino etkileşimlerinde /charm/ hadron üretimi üzerine araştırmalarda bulundu. 2003 yılından beri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Gran Sasso Laboratuvarı'ndaki OPERA deneyinde ve CERN'deki CMS projesinde araştırmalarına devam etmektedir.

OPERA deneyinde Türkiye'yi temsil eden ODTÜ ekibi: (soldan sağa) Navid Hosseini, Behzad Hoisseini, Doç. Dr. A. Murat Güler, Özgür Altınok, Serhan Tufanlı ve Mustafa Kamışçıoğlu