

ORGANİK GÜNEŞ PİLİ YAPTIK

PENCEREDEN ELEKTRİK

Güneş enerjisinin kullanılabilir hale getirilmesinde silikon temelli panel ya da fotovoltaik gözelerin ardından organik maddelerden yapılan ve bant gibi yapıştırılabilen yüzeyler görev almaya hazırlanıyor. Doğadaki fotosentez sürecini taklit ederek elektrik üreten bu teknolojinin ilk örnekleri ülkemizde de gerçekleştirilmeye başlandı. Birkaç yıl içinde odalarımızın pencereleriyle elektrik üretebilmemizi sağlayabilecek olan bu çalışmaları, TÜBİTAK'ın desteğiyle yürüten ekibin başkanına sorduk.

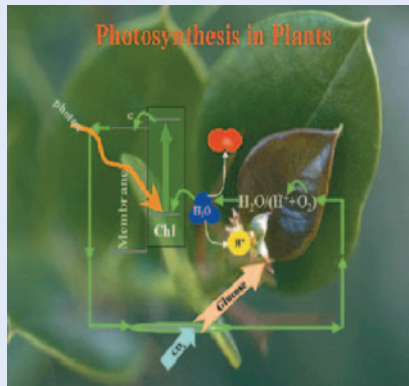
Nobel ödüllü bilimci Linus Pauling'in “*salt bilim, kendi adına bilim, merak olarak bilim, her yöne yönelebilir, her şeye meydan okuyabilir ve gelecek teknolojilere götüren tek yoldur*” yorumu, sanırım konumuz için uygun görünmekle birlikte bu deyim bir katkıda bulunmak istiyorum. Mesleki yaşamımda beni en çok etkileyen kişilerden biri olan değerli psikiyatrist Prof. Dr. Doğan Karan, bir gün bana “*Türkiye’de ODTÜ gibi bazı Üniversitelerde neden Fen ve Edebiyat Fakülteleri bir arada, tek bir fakülte halinde*” diye sormuştu ve tabii yanıtlayamamış, saçma sapan bir şeyler söylemiştim. Doğan hoca, “*Çünkü batıda Sanat ve Temel Bilim birlikte kabul edilir, her ikisi de insanoğlu’nun yaratıcılığının kaynağıdır,*” diye yanıtlamıştı. Bilim insanın doğadaki olayları merak ederek doğanın iç yapısını, mekanizmasını öğrenmesi, ve herhalde sanatta doğanın sunduğu olağanüstü yaşamı insanın duyguları ile birleştirip yüceltmesi ve bir ruh yaratması. Her iki yaratıcılık bir arada olduğunda, belki de insanoğlu olağanüstü gelişmeleri, teknolojileri oluşturabiliyor. Teknolojik bir sorunu çözebilmemiz için yalnız temel bilimi değil, bizi güdümlen-

bilecek o ruhu da bulabilmemiz gereklidir diye düşünüyorum. Türkiye’de neden Nobel ödüllü bilim adamı yok, neden bilim-teknolojide gelişmiş ülkeleri yakalayamıyoruz sorularının yanıtı, kaynak olan temel bilimin değil de bir sonuç olan mühendisliğin hep peşinden koşmamız, hele sanatı yalnız uyuşturucu bir keyif aracı olarak kabul etmemiz değil mi? Osmanlı İmparatorluğu zamanında Batı’nın temel bilim eğitimini değil, sadece silah üreten mühendislerini getirtmişiz, ve bu hep böyle, Cumhuriyet dönemimiz başlayana kadar devam etmiş. Sayın Erdal İnönü’nün İzmir’de verdiği bir konferans-

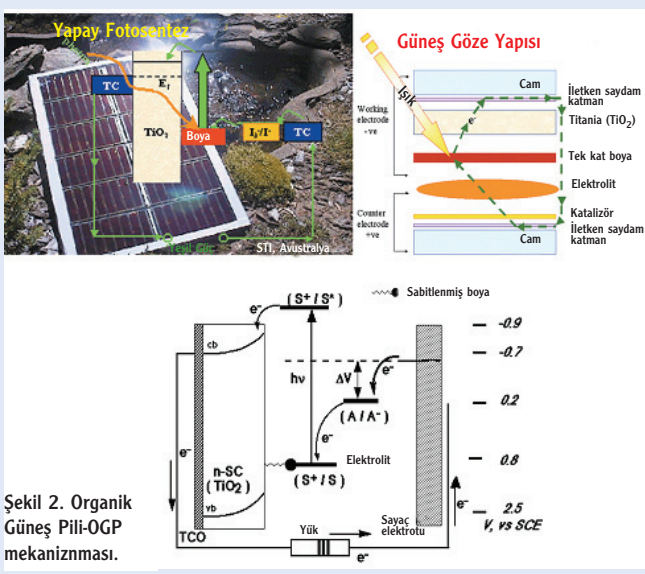
ta söylediği gibi, bilimin tarifiindeki merak deyiminin eski bir Osmanlı sözlüğünde ne yazık ki karşılığı: *Üzerine vazife olmayan işlerle uğraşmak!*

Son beş yıllık serüvenimizde organik güneş pilleri üretiminde az çok bir başarı gösterebilmiş olmamız, bilimin yanında bir ruhu da biraz yakalayabildiğimizden ötürü sanıyorum. Şimdi sizlere bu ruhu yaratanlarla birlikte geçirdiğimiz aşamaları ve konunun bilimsel, teknolojik sınırlarını açıklamaya çalışacağım.

Organik Güneş Pilleri olgusunu ilk oluşturanlar Türkiye Şişe Cam Fabrikalarının (TŞCF) Cam Araştırma Merkezinin değerli elemanlarıydı. Mayıs 2000’de TŞCF Cam Araştırma Merkezine, Güneş ışınımını altında fotoaktif maddelerin nasıl cam yüzeylerde otomatik dezenfeksiyon, organik kirlilikleri nasıl kolayca yok edebileceğini, teknolojik bir çalışmanın yapılabileceğini anlatmak için verdiğim uzun ve tartışmalı seminer sonunda Dr. Yıldırım Teoman, Dr. Baha Kuban, Dr. Reha Akçakaya, “*iyi güzel de biz bu konuda şu an ilgili değiliz, bir proje yapamayız, ama isterseniz güneş pilleri üzerine bir proje önerinizi değerlendirebiliriz*” dediler. Doğrusu afallamış-



Şekil 1. Bitki yaprağı üzerinde güneş ışınımını altında fotosentez mekanizması.



Şekil 2. Organik Güneş Pili-OGP mekanizması.



Şekil 3: 2001 yılında üretilen organik güneş pili.

tım, “ben güneş pili nedir pek bilmiyorum, herhalde size yardımcı olamam” dedim. Baha Kuban, “yok yok Sıddık bey, sizin anlattıklarınız zaten organik güneş pillerinin esası”, deyince o an beynimi fotosentez-fotobozunma çalışmalarımızdan elektrik elde edebileceğimiz sarhoşluğu sardı. Fakat birkaç saniye sonra bu işin nasıl olabileceğini hiç bilmediğimi anlayınca, “sanmıyorum ama, araştıracağım” yanıtını verdim.

TŞCF, acımasız rekabet içinde olduğu Avrupa, ABD, Japonya cam firmaları karşısında ayakta kalabilmek için her türlü ince film teknolojilerini geliştirirken, bazı firmaların fotovoltaik camlar yapma hedefinde olduğunu öğrenince bu işi nasıl yaparız, yaptırırız diye düşünmeye başlamış ve ben de tam o sırada karşılına çıkmışım. Aynı yıl temmuz ayında Almanya'nın Dresden kentinde, fotokimya kongresine tüm araştırma grubum ile katıldım. Kongre tebliğler kitabında benim gibi organik fotokimyacı olan Prof. Dr. Michael Graetzel'in⁴ organik güneş pilleri adlı konuşması olduğunu görünce koşa koşa dinlemeye gittim. O zaman bu işi gerçekten yapabileceğimizi kavradım ve türlü hayaller kurmaya başladım. Ancak, tabii sadece kavramak yetmedi. İlk kez ilkel bir organik güneş pilini iletken cam üzerinde titanyum dioksit üzerine emdirilmiş fotosentezde kullandığımız bir aromatik diimid ile Eylül 2000'de gerçekleştirip güneş ışığında avometrenin voltaj okunun oynadığını görünce heyecanlandım. Hemen İzmir'e davet ettiğim Baha ve Reha'yla aynı denemeyi çocukca bir koşuşturmayla tekrarladık. Ancak Ekim 2000 - Şubat 2001 sürecinde Fulbright bursu ile bulunduğum California Üniversitesi (Los Angeles) Kimya Bölümü'nde yaptığım literatür araştırmalarında bu işin o kadar da kolay

olmayacağını anlamaya başlamıştım. Sorun, bitkilerin milyonlarca yıllık fotosentez deneyimini nasıl laboratuvara taşıyabileceğimizdi.

Organik Güneş Pilleri, (kısaca OGP) ya da Boyar Maddeli Güneş Pilleri, aslında doğadaki fotosentezin biraz acemice taklidinde başka bir şey değil. İncecik yeşil bir yaprak yeşil klorofiliyle güneşin ışık enerjisini ustaca soğurup, içindeki bazı selülozik yapılardan bu enerjiyle elektron koparmakta ve elektronu yine aynı ustalıklarla kullanarak, zincirleme reaksiyonlarla su ve karbondioksitten karbohidrat elde edebilmekte. Bugün insanoğlunun tam çözemediği bu kimyasal/fotokimyasal reaksiyon zincirleri içinde oksijen de üretilmekte. Ortalıkta elektron mermilerinin dolaşması pek tabii ki yalnız karbohidrat, oksijen üretimi değil, eğer bir döngü sağlanabilirse elektrik üretimi de olacak demektir. Şekil 1'de kavunıçi renkli gelen foton güneş ışığı enerjisi, *Chl* ise klorofildir. Işık ile klorofil uyarılarak üst enerji düzeyine geçiyor, fazla enerji alan klorofil molekülü rahatlayabilmek için dışarıya bir elektron veriyor ve işte ondan sonra da adeta yaşam döngüsü de başlıyor. Elektron yolda yakaladığı karbondioksiti suyla birleştirip glüköz

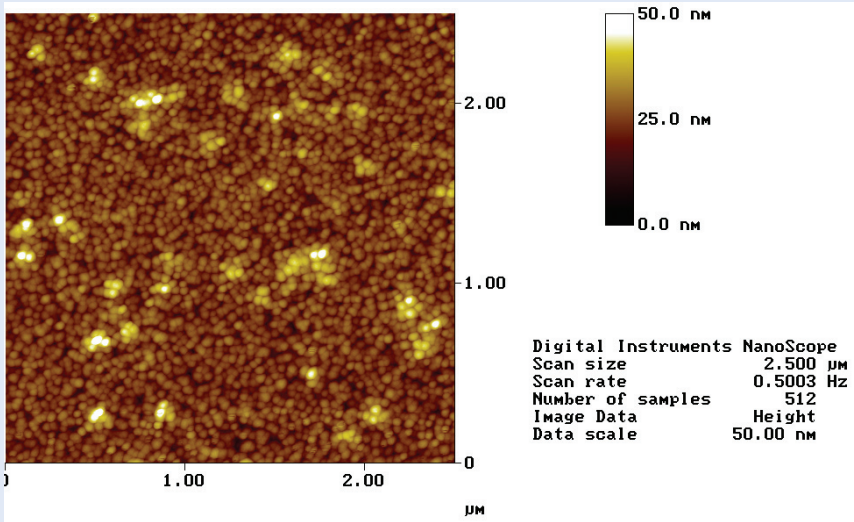
karbohidratını oluşturuyor, sonra bununla da yetinmeyip suyu da parçalayıp oksijen ve proton kasyonu oluşturuyor. En sonunda da klorofilin sakin haldeki alt temel enerji düzeyine dönüp tekrar bir güneş fotonunun gelip kendisini yeniden oyun alanına çıkartmasını bekliyor.

Elektronun kimyasal yapıları parçalayıp-birleştirmekle uğraşması yerine, yoluna sağlam kimyasal yapılar getirip bir an önce vakit ve güç kaybetmeden çıktığı klorofil evine geri dönmelerini sağlayabilirsek pek tabii elektrik elde etmiş oluruz. Bu, tıpkı bir ırmakta akıntıya karşı yüzerek, tüm enerjimizi harcayarak karşıya geçebilmeye çalışmak yerine, ırmağa büyük kayalar koyup üzerlerinden hopyalarak, zıplayarak hızla karşıya geçmeye benziyor. Şekil 2, bu iri kayaların neler olduğunu gösteriyor. Birincisi, kullanacağımız boya madde (*dye*), çok sağlam olmalı. Güneş ışığını istediğimiz görünür bölge dalga boyunda soğurabilmeli ve dışarıya elektron verdiğinde sendeleyip çevresindeki başka moleküller ile reaksiyona girmemeli, yani bozunmamalı. Bunun için organik boya maddemizi klorofil yerine başka birisiyle değiştirmemiz gerekli. Bildiğiniz gibi, güzel yeşil renkli yapraklar bir süre sonra sararıp bozarmakta.

Organik güneş pillerinin babası sayılan Prof. Graetzel, bazı rutenyumlu organometalik kompleksler kullanmış. Bizse, bir alternatif olarak perilen imid adlı organik yapıları da seçtik ve denedik. Her iki tür yapılar da yüzlerce kez yoğunlaştırılmış güneş ışıkları altında bozunmadan işlev görebilmekte. Oysa bildiğimiz bazı diğer boya maddeler, örneğin metilen mavisi, fluoresin, bu koşullarda saniyeler içinde tamamen bozunmakta. Elektron, bizim renkli boya maddemizin üst enerji düzeyine



Şekil 4. Nanomorfolojik yapıda saydam TiO₂ üzerine absorblanmış perilendiimid boya maddesi (Yazılar cam tabakanın altında).

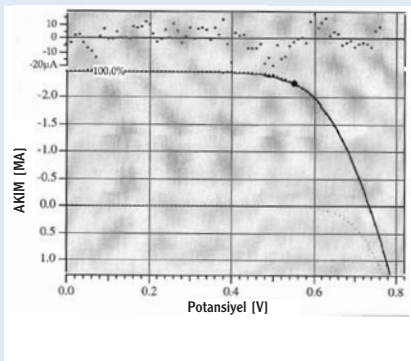


Şekil 5. Nanomorfolojik yapıdaki bir TiO₂ tabakası üzerinde adsorblanmış perilendiimid boyar maddesinin AFM-Atomik Kuvvet Mikroskopi görüntüsü.

den çıktıktan sonra bir merdivenden aşağı inmeli. Aşağı inemezse, geriye döner ve elektrik elde etme hayalimiz de sona erer. Şekil 2'deki grafikte, bu merdivenlerin nerelerde, hangi düzeylerde olduğunu görmekteyiz. Moleküller yapıların merdivendeki yerlerinin önceden saptanması, güneş pilinin çalışıp çalışmayacağını en önemli ön bulgusudur. Bunun için, kullanacağınız boyar madde ya da fotoaktif iletken metal oksit veya elektrolit kimyasallarınızın önceden redoks potansiyellerini ölçüp, şekildeki merdiven grafiğinin sağında görünen enerji skalasında nerede olduğunu görmemiz gerekir. Bizim OGP'mizde, güneş ışıkları altında üst düzey enerji seviyesi uygun bir merdiven görevi yapan sağlam, dayanıklı TiO₂ molekülü seçildi. Tabii boyar maddemizden gelen elektronun titanyum dioksit üzerinden yoluna devam edebilmesi için, iletken bir ortam gerekir. Bu görevleri yerine getirme amacıyla, cam bir yüzeyin üzerine önce çok ince, nanometre (10⁻⁹ metre) kalınlıklarda iletkenliği sağlayan kalay dioksit tabakası, onun üzerine de ince bir titanyum dioksit tabakası kaplanıyor. Her iki tabaka da cam üzerinde çok ince, yoğun ve homojen olduğu

için cam yine saydam kalıyor. Yani cam, camlığından bir şey kaybetmiyor, tersine birde üstüne üstlük elektrik geçirebilme yeteneğini kazanıyor. Elektron, bir elektrik teli üzerinden bir diğer elektrod olan kalaydioksit kaplı cama aktarıldığında, pil içinde ters yönden elektronun seyahati başlıyor. İkinci karşıt elektrodan da şekil 2'de görülen I₃⁻/I₂, iyot-iyodür redoks çifti merdiveni üzerinden boyar maddemizin temel alt enerji düzeyine gelerek döngüyü tamamlayıp, elektrik akımımızı üretebilmemizi sağlıyor. Tüm tabakaların kalınlığı, nanometreler düzeyinde oluyor. Bir organik güneş pilinin işlevsel kalınlığı, 3-5 mikron yani 3000-5000 nanometre kadar. Sanırım nanoteknoloji deyiminin nereden geldiğini anlamışsınızdır. Bir molekülün boyutları da 10-100 nanometre kadar olduğu için, organik güneş pili gibi teknolojik olgulara Nanoteknoloji yerine Moleküller Teknoloji deyimini kullanmak belki daha doğru olabilir.

Bu işe soyunduğumuzda ne yazık ki nanometre hassasiyetinde ince filmler hazırlayabileceğimiz bir laboratuvar alt yapımız olmadığı gibi, sol-jel ince film teknolojisine hakkında da ancak kısmi bilgi ve deneyimimiz vardı. Zorunlu olarak TŞCF cam araştırma merkezi laboratuvarlarında çalışmalarımızı yürütmeye başladık ve ilk çalışmalarımız bizzat ben yaptım. Bu laboratuvarlarda sol-jel ince film teknolojisi ABD'den TŞCF danışmanı sayın Dr. Bülent Yoltaş ve diğer bir çok değerli araştırmacıların katkılarıyla çok ileri düzeye ulaşmıştı. Her gün adeta yeni bir heyecanla yeni bir şeyler öğreniyor ve yeni küçük bir gelişme sağlıyorduk. Ancak, Ege Üniversitesi'ndeki akademik görevlerim nedeniyle düzenli çalışmaların yapılabilmesi için doktora öğren-



Şekil 6. Üretilen % 7,5 verimli bir OGP grafiği (V_{oc} = 724 mV, I_{sc} = 14,1 mA/cm², FF = 0,73).

cim Canan Karapire'nin İstanbul'daki Cam Araştırma Merkezi laboratuvarlarına, gitmesi gerekti. Bu süreçte sürekli olarak sol-jel ince film teknoloji yeteneğimizi geliştirmeye çalıştık ve perilen diimid molekülleri, sıvı elektrolit sistemleriyle yüzlerce güneş pili yaptık. İlk yaptığımız tarihi pillerden bir tanesinin fotoğrafı Şekil 3'te görülüyor. Voltaj, görüldüğü gibi 0,6-0,7 Volt kadar olmakla birlikte, akım birkaç mikroamper düzeyini aşamıyordu. İyodürlü sıvı elektrolit tabakası da pilin ömrünü kısaltıyordu. Oysa, bilindiği gibi, mevcut ticari silikon pillerinin ömrü 30-40 yıl. Graetzel ise çok daha kararlı ve yüksek verimli OGP'ler yapıp bilimsel yayınlar çıkarıyordu. Canan, Celal Bayar Üniversitesi'ndeki görevleri nedeniyle düzenli ve sürekli İstanbul'da kalamadı, ve görevi Kırcalı'lı (Bulgaristan) yüksek lisans öğrencisi Ceylan Zafer devir aldı. Ceylan'ın Cam Araştırma Merkezi'ne kısa sürede uyum sağlaması, çevresiyle sağlıklı diyalog kurabilmesi, özverili olarak uzun süreli çalışmaları yürütebilmesi ve yurt dışından bilgi transferiyle OGP çalışmalarımız hızlandı. Adım adım ilerlemeye başladık. Verimi artırmak için gerekli nanomorfolojik yapıda titanyum dioksiti yurt dışından getirmek yerine, önce Cam Araştırma Merkezi'nde, sonra İzmir'de yaptırdığımız yerli otoklavla Ege Üniversitesi'nde oluşturmayı başardık. Bu, bize saydam ve daha etkin titanyum tabakası oluşturma yeteneğini sağladı (Bak Şekil 4). Nanomorfolojik yapıdaki 20-40 nm boyutunda titanyum dioksit taneciklerini oluşturabildiğimizi ispatlayan Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) spektroskopisi resimleri, bilimsel yayınlara dayanak oldu (Şekil 5). İzleyen önemli bir gelişme de, içinde İsviçre Lozan Üniversitesi'nden Prof. Dr. Michael Graetzel'inde olduğu 12 ortaklı Avrupa Topluluğu MOLYCELL-Esnek Organik Güneş Pilleri IV. Çerçeve Projesine katılmayı başarabilmemiz oldu. Londra Üniversitesi'nden Prof. Dr. James Durrant, Siemens, Konarka gibi firmaların ve Almanya'dan Fraunhofer Enstitüsü'nün bulunduğu gruba girebilmemizde bize destek olan Linz Üniversitesi (Avusturya), Organik Güneş Pilleri Enstitüsü'nün (LIOS) kurucusu sayın Prof. Dr. Serdar Niyazi Sarıçiftçi'ye teşekkür borçluyuz. Artık bugün

dünyada yapılan gelişmeleri bu proje iletişimi kanalıyla çok daha yakından takip edebiliyoruz. Genç araştırmacılarımız, Avrupa'daki en ileri düzey organik güneş pili araştırmalarının yapıldığı laboratuvarlarda 1-3 aylık sürelerle sürekli çalışmalar yapabilmeleri imkanıyla arı gibi gidip geliyorlar. Laboratuvarlarımızda kendi kimyasallarımızla ürettiğimiz OGP'lerde birim yüzeyde (1 cm²) 9 % verime kadar ulaşabildik. Şekil 6'da 7.5 % verimde ürettiğimiz bir OGP akım-voltaj grafiği görülmekte. Bugün benim ve TŞCF'de Dr. Yıldırım Teoman'ın ofisindeki 2 yıl önce ürettiğimiz OGP'ler takır takır çalışarak, kararlılık sorunumuzu çözdüğümüzü ispatlamakta.

Enstitümüze TÜBİTAK, DPT proje destekleriyle sağladığımız bir nanoteknoloji-ince film laboratuvarını kurabilmiş durumdayız. Artık araştırmacılarımızın TŞCF Cam Araştırma Merkezi'ne uzun süreli çalışmalar için gitmelerine gerek kalmadan, üretim çalışmalarımızı daha hızlı olarak yapabilmekteyiz. Ürettiğimiz pilleri laboratuvar koşullarında standart güneş ışını verebilen (1,5 AM sun) sistemle çalıştırarak bilgisayar kontrollü I-V ölçümü yapan elektronik cihazlarla, saatlerce gerek verim ve gerekse dayanıklılık testleri yapabilmekteyiz. Bu testlerimizi Londra, Lozan ve Linz Üniversiteleri laboratuvarlarında da tekrarlayarak bilimsel sonuçları kesinleştiriyoruz. Şekil 6'da bu tür testler sonucu %7,5 verim gösteren bir OGP'mizin I-V (akım-voltaj) standart grafiğini görmekteyiz. Birim yüzeyde verim çalışmalarımız hedefine



Şekil 7. 15x12 cm boyutunda ve 3,7 Volt, 50 mAmper gücünde mekanik/alarm saati çalıştıran OGP.

ulaştığı için, modül düzenekleri yani büyük boyutlarda (hedef 1-1,5 m²) güneş pillerimizi üretebilmek için çalışıyoruz. En son 15x12 cm boyutunda ürettiğimiz 3.7 Volt ve 50 mAmper gücündeki bir pilimiz, mekanik bir saati ve alarımını çalıştırabilir güce gelmiş bulunuyor (Şekil 7). Bilimsel yayınlar yanında, 2 adet patent başvurusu da yaptık. Birim pillerden büyük boyutlara geçilmesi, birim pil hücrelerinin milimetrik duyarlılıkta eşdeğer olmalarını ve elektriksel bağlantıların minimal dirençte olmalarını gerektiriyor. Bu çalışmalar için ASELSAN gibi kurumlarla işbirliğini gerçekleştirilmeyi hedefliyoruz. Gelecek iki yıl sonunda elektrik üretebilen 1-1,5 m² boyutunda fotovoltaik renkli pencere camların pilot üretimini sizlere sunabilmeyi umuyoruz.

Tüm bunların yanında, nanoteknolojik yeni mikroelektronik aygıtları üretebilmek kapasitemizimizin ortaya çıkmaya başlaması bizleri yeni heyecanlara ve yeni serüvenlere de sürüklemeye başladı. Bugün elektronik sana-

yiinde kullanılan LED lambaların iç yapısının, teknolojisinin OGP lerle tamamen aynı olduğunu öğrendik. Araştırma grubumuzda Yrd. Doç. Canan Karapire, Yrd. Doç. Dr. Şerafettin Demic organik LED lambalar (OLED) üretimi üzerine TÜBİTAK projesi desteği aldılar. Laboratuvar alt yapımızı bu yeni üretim için hazırlıyoruz. Yine grubumuz üyesi Yrd. Doç. Dr. Şule Erten ise, ekim-aralık 2004'te Avusturya LIOS Enstitüsünde yaptığı çalışmada, yine aynı temelde farklı bir teknolojik ürün olan, organik transistörlerin kendi kimyasallarımızla üretimi konusunda başarı sağladı. Profesör Sarıçiftçi ile ortak bir bilimsel yayın ve patent başvurusu yaptık. Yakında ülkemize ışıkla çalışabilen organik transistör üretim teknolojisini de getirebileceğini umuyor ve ülkemizin geleceğinin petrol, doğal gaz kâbusundan kurtarılmasını diliyoruz. Yenilenebilir enerjiler denen güneş, rüzgar, biyokütle/biyogaz kaynakları sadece ülkemize ekonomik değer kazandırmanın yanından Dünya'nın ekolojik dengesinin korunabilmesine de katkı yapıyorlar. Atatürk Türkiye'sine de yakışanın bu olacağı görüşündeyiz.

Şekil 8'deki fotoğrafta görülen Kasım Ocakoğlu, Mahmut Kuş, ve Güneş Işınımlı Fotokimya Grubu'nun diğer değerli üyelerinin organik sentezler, spektroskopik çalışmalarıyla tüm diğer elemanlarının da katkıları gerçekleşmiştir. Projemizin başarılı olmasında, özgür bir üniversite ortamında bizlere destek sağlayan rektörümüz sayın Prof. Dr. Ülkü Bayındır ve ekibine minnet hislerimizi ifade ederiz. Saygı ve sevgilerimizle.

Prof. Dr. Sıddık İçli
Ege Üniv., Güneş Enerjisi Enst. Md.



Şekil 8. Ege Güneş Enerjisi Enstitüsü Güneş Işınımlı Fotokimya araştırma grubu üyeleri.