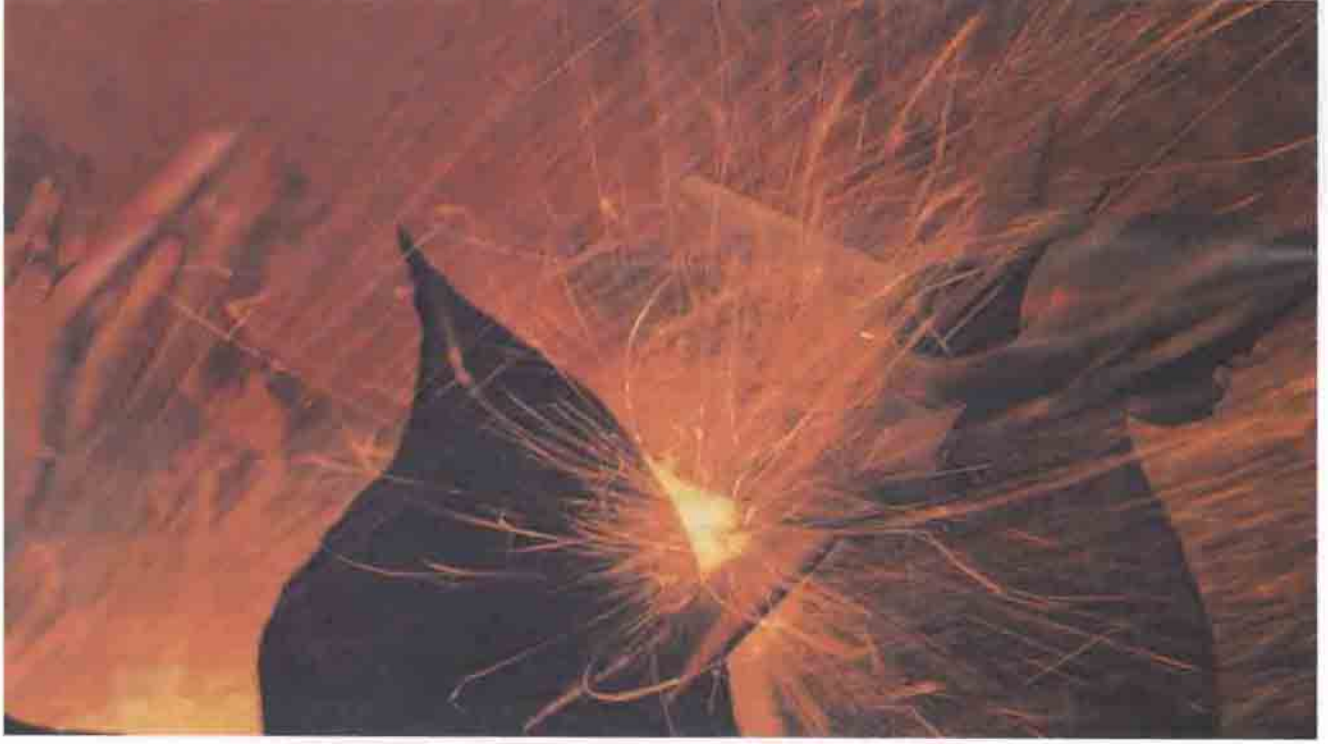


# Kristal Güçler



**E**N SERT maddeler arasında bulunuyor. Bilimde daha sert olarak sadece elmas ve bor-karbit biliniyor. 2000 °C'a kadar olan sıcaklıklara dayanabiliyor. Silisyumdan daha esnek bir yarı iletken. Bütün bu nitelikleri taşıyan silisyum karbit (SiC) evdeki zımparadan, depolar için zırhlı bir kaplamaya, atmosfere giren araçlar için termal bir koruma tabakasından büyük mercekle ve aynalar için güçlü ama hafif bir taşıyıcı yapıya kadar uygulamaya yatkın bir malzeme.

Ancak, SiC için en yeni ve akıllıca uygulamalar yarıiletkenler dünyasında. Özelliklerinin birleşimi, SiC'den yapılacak sensörlerin ve elektronik anahtarların silisyum yongaları bozabilecek koşullarda da işleyebileceğini gösteriyor. SiC cihazları, araba ve uçak motorlarında, jeotermal sondaj kuyularında ve hatta Güneş Sistemi'nin en sıcak gezegeni Venüs'te bile yüksek sıcaklıklarda çalışabiliyorlar. SiC cihazları ayrıca, katı-hal cihazlarını kullanarak yüksek güçte mikrodalga üretmek üzere yüksek gerilimlerde iş-

leyebilecek ve fiziksel devre kesiciler yerine akıllı elektronik devreler kullanılarak güç şebekelerini kontrol edileceklerdir.

Öyleyse SiC hakkındaki bu gereksiz telaş neden şimdi? Herşeyden önce, bu madde 30 yıl ya da daha fazla bir zamandanberi laboratuvarlarda gözden düşmüş durumda. Cevap, araştırmacıların seri üretimle üretilebilecek SiC levhaları daha yeni keşfetmiş olmaları. Bu ilerlemenin yanı sıra, gitgide daha iyi kristaller elde etmek üzere daha az kusurlu SiC kristalleri üretme teknikleri geliştirmişler.

SiC levhaların evrimi bütün endüstri dallarında devrim yapabilir. Pratik SiC cihazlar güç üretimi ve dağıtım endüstrisinden, gezegen araştırmalarına kadar her yerde ortaya çıkabilir. Yüksek tanımlı televizyon (HDTV) yayınlarında ve arabadan çıkan egzoz ölçümünde yapılan ilk uygulamalar test edilmeye başlamış.

Öyleyse, SiC'i bu kadar özel yapan ne? Bunun cevabı elektronların bu madde içinde davranış biçimlerinde yatıyor. Yarıiletkenler, içlerinde atomların atomik bağlarla yakın bir şekilde

birbirlerine tutunduğu kristal maddelerdir. Bu yakınlık, komşu atomlardaki elektronların bir atomdan diğerine geçmelerine izin veriyor. Bunun toplam etkisi de madde içinde elektronlar için enerji bantlarının yaratılması.

Yarıiletkenler özeldirler, çünkü kristal yapıları değerlik bandı olarak bilinen en düşük enerji bandını dolduracak yeterli elektron içerir. Bu bir çeşit elektronik kilitleme yaratır-hiçbir elektron hareket edemediği için akım geçmez. Bu kilit, maddelerin yalıtkan olarak davrandıkları mutlak sıfırda, bütün yarıiletkenler için oluyor.

Bununla beraber, eğer elektronlara ek bir enerji verilirse, hareket edebilecekleri ve akım oluşturabilecekleri, iletkenlik bandı denilen, bir üst banda atarlar. Böylece, yarıiletkenler hem yalıtkan ve hem de iletken olarak davranabilirler. Değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki farka bant aralığı deniyor, ve bu da maddenin en önemli özelliklerini belirliyor.

Yarıiletkenler başka bir şekilde de akım taşıyacak özellikte yapılabilir. Değerlik bandını doldurmak üzere ya



çok fazla ya da çok az elektron içeren atomlar (dopant atom) ekleyerek. Örneğin, bir azot atomunun bu kuşağı doldurabilecek bir fazla elektronu vardır. Bir yarıiletken içinde, bu fazla elektron (negatif yüklü), yük taşıyıcısı olarak davranır ve bu da akımla sonuçlanır. Azot katkılı SiC, negarif ya da n-tipi yarıiletken olarak biliniyor. Diğer yandan alüminyumun bir az elektronu vardır ve böylece kilitlemiş elektron yapısında bir "delik" yaratır. Delikler, sanki kilitlemiş bir trafik akmaya başladığında, arabalar arasındaki boşlukların geriye doğru gitmesi gibi elektron akışına karşı hareket eden pozitif yükler gibi davranırlar. Bu da, alüminyum katkılı SiC'in neden pozitif ya da p-tipi yarı iletken olarak bilindiğini gösterir.

n- tipi ya da p-tipi yarıiletkenlerin taşıyabilecekleri yük miktarı eklenen dopant atomların sayısına bağlıdır ve bu sayı üretim sırasında kolaylıkla kontrol edilebilir. Yarıiletkenlerin iletken özelliklerinde bu şekilde ince ayar yapılabilmesi, onları çok esnek malzemeler yapar. n- tipi ve p-tipi malzemeler mikro-yongalardan radyolara, ışık yayıcı diyotlardan, pano göstergelerine kadar herşeyde kullanılan transistörlerin yapı taşlarıdır.

Ancak, bazı durumlarda yarıiletkenlerin bu kendine özgü özellikleri bozularak, onların diyot ve transistör olarak kullanılamayacak hale getirir. Örneğin, sıcaklık artarsa, elektronlar değerlik bandından iletkenlik bandına atlamaya yeterli enerjiyi kazanırlar ve madde yarıiletkenden iletkene dönüşür.

Bu, silisyum yongaların ve sensörlerin yüksek sıcaklıkta çalışmamasının nedenidir. Çoğu 125 °C'in üstünde çalışmaz olurlar. Otomobil ve uçak motorlarında kullanılan silisyumlu elemanlar ya yüksek sıcaklıklara karşı yalıtılmalıdır ya da etkili şekilde soğutulmalıdır.

## Tahrip Yarışı

Yarıiletkenlerin performansı gerilimle de sınırlıdır. Bir voltaj uygulamak, maddenin ızgara yapısı içinde iletken elektronları hızlandıran bir elektrik alanı yaratır. İletim bir çeşit tahrip yarışına benzetilebilir-elektronlar ileri doğru hızlanır, bir atoma çarpıp,

enerji bırakır, yine ileri doğru hızlanır, çarpışır... Bu dikkatsiz sürücülüğün makroskopik etkisine direnç denir.

Ancak, eğer gerilim yeteri kadar yüksekse, bir atoma çarpan hızlanmış bir elektron, bir değerlik elektronu iletkenlik bandına geçirecek yeterli enerjiyi verir. Bu yeni iletkenlik elektronları da hızlanır. Bunlar da daha çok değerlik elektronlarını boşaltarak bir çığ yaratırlar. Bunun sonucu, yarıiletkenlik durumundan iletkenlik durumuna geçiş şeklinde ortaya çıkar.

Bant aralığı küçük oldukça yarıiletkenin yüksek sıcaklık ve gerilime duyarlılığı artar. Oda sıcaklığındaki silisyum için elektronların bant aralığını atlamaları için gerekli enerji 1.1 eV'dur (elektron volt). Başka bir yarıiletken olan galyum arsenitin, 1.43 eV'dur. Ancak, SiC'de aralık 2.9 eV'dur ki bu da malzemeyi daha esnek yapar. SiC yarıiletkenler, 600 °C'in üzerine çıkan sıcaklıklarda ve silisyumun dayanabildiği elektrik alanlarının 10 kat fazlasında çalışabilir.

## Büyüyen Kristaller

Pratikte, bu harika özellikleri gösteren SiC kristalleri yapmak zor oldu. Keşfin ilk adımı, 80'lerin ortalarında Kuzey Carolina Eyalet Üniversitesinden araştırmacılar, SiC kristallerini büyük ölçekte geliştirme yolunu bulduklarında atılmış. Kullandıkları teknik, silisyum ve karbonun toz halindeki karışımını, süblimleşmesi için 2500 °C'e kadar ısıtmak. Daha sonra

bu gaz SiC'den bir tohum kristali üzerinde yoğunlaştırılıyor. Sonuçta ortaya çıkan büyük kristal, SiC esaslı cihazlarda taban olarak kullanılmak üzere levhalar halinde dilimlenebiliyor.

En büyük sorunlardan biri, kristal yapısında mikroboru olarak bilinen bozukluklar. Bunlar, kristalin istenilen elektronik özelliklerini bozarak kısa devre eden mikrometre büyüklüğündeki oyuklar. Mikroboruları olmadan SiC kristalleri yapmak zor bir iş. Bu yüzden, çalışmalar bunların sayılarını, etkilerinin az olacağı bir düzeye indirme üzerinde yoğunlaştırılmış. 1980'lerin başında SiC kristallerin cm<sup>2</sup>'sinde en az 1000 mikroboru bulunuyormuş.

O zamandan beri geliştirilen yöntemlerle en son SiC kristallerinde cm<sup>2</sup>'de 10 mikroboru bulunuyor. Kristallerde daha büyük. Kristaller bir kaç cm büyüklüğünde mavi ya da yeşil seramikten oluşan yarısaydam levhalar. Kalınlıkları ise birkaç mikrometreden birkaç yüz mikrometreye kadar olabiliyor.

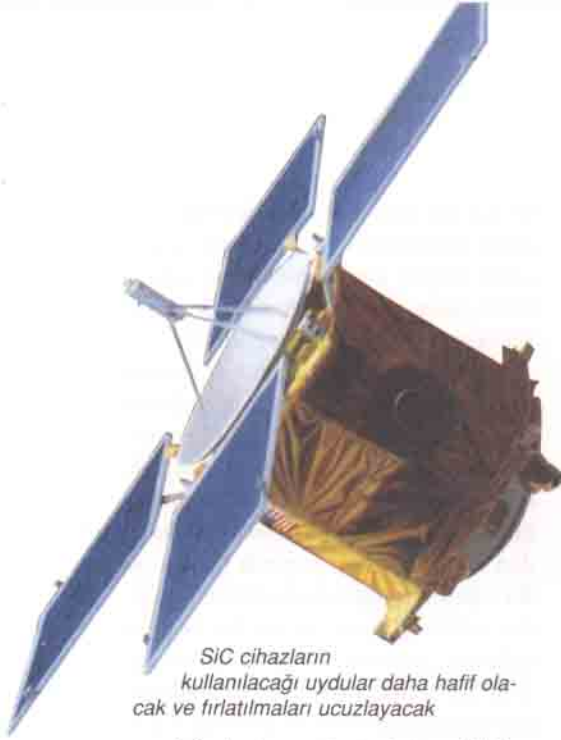
Ancak, SiC levha imalatçıları, pratik ve ucuz SiC cihazların yapılabilmesi için henüz levhaların boyunu iki katına çıkarma ve bozukluk sayısını cm<sup>2</sup>'de bir iki taneye indirme durumundalar. Bu, belki de SiC endüstrisinin karşı karşıya olduğu en büyük mücadele ve tabii ki imalatçıları çözümlerini başkalarıyla paylaşma konusunda isteksizler.

Bir SiC taban elde edildikten sonra bu faydalı bir cihaza çevrilmelidir. Bu-



SiC cihazlar, sıcaklığın kurşunu eritecek kadar fazla olduğu Venüs'te de çalışabilecek





*SiC cihazların kullanılacağı uydular daha hafif olacak ve fırlatılmaları ucuzlayacak*

nun için levhanın üstünde ince SiC tabakaları geliştirilmesi gerekiyor. Elektrik devre elemanları istenilen bir düzende seçici, doplama ve oyma yoluyla bu levhaların üzerinde yaratılıyor. Hemen hemen bütün elektrikselsel aktivite bu katmanlarda gerçekleşiyor.

Bilim adamları bu metodu kullanarak, SiC'den cm<sup>2</sup>'de 100 hatası olan yarıiletken cihazların prototiplerini geliştiriyorlar. İlk uygulamalardan biri yüksek güçte mikrodalga üretimiydi. Güçlü mikrodalgalar genellikle, içinde hızlanan elektronların mikrodalgalar yaydığı bir vakum tüpü olan klistronla üretiliyor. Ancak, klistronlar enerjilerinin yarısını ısı kaybı olarak harcadıkları için verimsizdirler. Ayrıca çok pahalılar, tanesi 30 000 Dolar.

Bu fiyat vericilerini HDTV'ye çevirmek isteyen TV istasyonlarının en büyük sorunlarından biri. Medya imparatoru Murdoch'a göre maliyet korkutucu. Sahibi olduğu FOX ağının değişimi için 100 milyon Dolar gerekiyor.

Maliyeti düşürmenin bir yolu, vakum tüplerini seri üretimle üretilebilen ve daha ucuz olan katı-hal cihazlarıyla değiştirmek. Ancak, mevcut silisyum ve galyum arsenit gibi yarıiletkenler, TV vericilerine yeterli güçte mikrodalga üretmek için gereken gerilime dayanamayabilir.

SiC cihazların ilgi yaratacağı başka bir alan da içten yanmalı motorların izleme ve kontrolü. Bu alandaki aletler mühendislerin yakıt verimini artırma ve kirliliği azaltma çalışmalarına yardım edecektir. Normal olarak bu işi yapan silisyumlu elektronik cihazlar ve sensörler 125 °C'a kadar olan sı-

caklıklara dayanabilir. Cihazlar motorun bu sıcaklığı geçmeyen yerlerine monte edilmelidir.

Diğer yandan, SiC cihazları motor içinde hemen hemen her yere yerleştirilebilir. Daha hassas ölçümler için silindirik başlığına doğrudan bağlanabilir ya da egzoz borusunun içine yerleştirilebilirler. Daha hassas ölçümler ise verimin artırılması ve azaltılmasına olanak verecektir.

Bu çok yönlü kullanım kolaylığı sayesinde, daha az kablo ve bağlantıya gerek duyulacak ve bu da daha az bakım gerektirecek ve daha fazla güvenilirlik sağlayacaktır.

Yüksek sıcaklık sensörleri askeri uçakların işlevini de çok değiştirecek. ABD Savunma Bakanlığı geleceğin askeri uçaklarında aktif soğutmaları azaltmak hattâ tamamen yok etmek istiyor. SiC cihazları, uçağın elektronik cihazlarının fazla ısınmalarını önleyen soğutma sistemlerinin yerini alabilir.

ABD Hava Kuvvetleri F-16'larda ileri SiC elektroniklerinin kullanılmasıyla uçağın yaklaşık 300 kg hafifleyeceğine inanıyorlar. Bu yük yerine ek yakıt ya da silah depolanabilir. Soğutma teçhizatı olmayınca uçak daha az bakıma ihtiyaç duyacak. Ticari uçaklar da bundan faydalanacak. İşletmeciler yakıt ve bakıma ayırdıkları paradan milyonlarca dolar tasarruf edecekler.

Ohio'daki, NASA Lewis Araştırma Merkezi'nden ve Pasadena Jet İtki Laboratuvarı'ndan (JPL) araştırmacılar bir otomobil egzoz sisteminin dışarı ne kadar hidrokarbon gazı verdiğini ölçmeye yarayan tek yongalı bir SiC mikro-sensörü geliştirmişler. JPL sensörü ince bir gözenekli SiC tabakası içeriyor. Tabaka yüksek sıcaklıkta hidrokarbon gazını yüzeyinde topluyor ve bu da tabakanın iletkenliğini değiştiriyor. İletkenlikteki değişiklik ne kadar egzoz çekildiğinin ölçüsünü veriyor. Şimdiye kadar sadece büyük ve pahalı spektrometreler hidrokarbon gazını doğrudan ölçebiliyordu.

Bu mikrosensör için "Otomotivdeki uygulamalar buzdağının sadece görünen kısmı" diyor, JPL'den Virgil Shields ve açıklıyor. "Endüstriyel yağların bozulması, insan çevresinin uzaktan algılanması ve organik maddelerin çürütmesi diğer potansiyel uygulamalar."

Ancak, öncelikle üstesinden gelinmesi gereken sorular var. Herhangi bir madde SiC'le yüksek sıcaklıkta temas ederse etkileşime giriyor ve özelliklerini değiştiriyor. En büyük sorun alüminyum ve nikel gibi kontakt yapmakta kullanılan maddeler. Shields bunu ve diğer problemleri çözmek için daha fazla çalışma gerektiğine inanıyor. "Gerçekte, ihtiyacımız olan şey böyle bir sensörü ticari olarak üretecek bir mali kaynak bulmak" diyor.

SiC'in belki de en heyecan verici uygulaması elektrik şebekelerinde çıktı ve elektriğin dağılımını kontrol etmek için gereken "akıllı" elektronik aletler. Elektrik şirketleri güç şebekelerinin farklı bölgelerindeki talebi ölçüp kontrol etmekte zorlanıyorlar çünkü elektronik anahtarlar yüksek gerilimde güvenilir bir şekilde çalışmıyor. Bunun yerine talebi merkezi güç istasyonlarında mekanik voltmetrelerle ölçüyorlar. Güvenilir bir servis sağlamak için de ihtiyaçtan fazla güç üretiyorlar. Elektrik şirketleri, harcanandan ortalama olarak % 20 fazla elektrik üretiyorlar. Bu da büyük bir israf.

SiC cihazlar bütün bunları değiştirebilir. Uzaktan kumanda ile talepteki değişiklikleri ölçer ve gerektiği zaman şebekenin bazı bölgelerindeki gücü diğerine yönlendirirler. Daha verimli kullanımla fazla üretim azaltılabilir.

SiC cihazlar, bir yandan Dünya'da sağlayabilecekleri tasarruf milyarları bulurken, öte yandan Güneş Sistemi'nin araştırılmasına da yardımcı olabilirler. Uydularda, hava akımı olmadığı için, elektronik cihazlar tarafından üretilen ısının dağıtılması başka yollar gerektiriyor. Kullanılan yöntem termal ışıma ya da bir sıvıyı uzay boşluğunda buharlaştırma.

Ancak, yüksek sıcaklıkta çalışabilen SiC cihazlarla buna gerek duyulmayacak. Sonuç olarak uydular daha hafif olacaklar ve fırlatılmaları ucuzlayacak.

SiC cihazlarının olanak sağlayacağı en egzotik hedef, yüzey sıcaklığının 450 °C dolaylarında olduğu Venüs'ün araştırılması. Venüs'e gidış uzakta gözüküyor. Ancak, Dünya'daki yaşam için SiC'in sağlayacağı yararlar daha çabuk gelmelidir.

Allan, R., *New Scientist*, 14 Haziran 1997  
Çeviri: Selda Ant



# Atıksu Sorununa Bitkiler Çözüm Getiriyor

Bitkiler, artık bizim için daha çok şey yapacağı ve çevrede yarattığımız karışıklıkları düzeltecek bir sanayi dostu olacağı benziyor.

Mikroorganizmaların, denize sızan petrol gibi maddeleri temizlediği biliniyor. Günümüzde ise, lağım akan yerleri ya da terk edilmiş madenlerden sızan ve öldürücü boyutta asitli olan suları temizlemek amacıyla bitkiler yapay bataklıklara dikiliyor. Bazı bitkiler, çok zehirli olduğu bilinen bazı ağır metalleri dokularında biriktiriyor. Bu tip bitkiler, yalnızca sorunu çözmekle kalmayıp, satılabilecek bir ürün oluyor ve dönüm başına yüzlerce dolar kazandırabiliyor.

Bitkiler yalnızca kirlenmiş metallerin temizlenmesine yardım etmiyor; organik bileşikler de yapılarında biriktiriyor ya da parçalıyor. Kavak ağaçları petrolle kirlenmiş yeraltı sularının bulunduğu bölgelere dikildiğinde, petrolün yapısındaki hidrokarbonları topraktan alarak biriktiriyorlar. Kavaklar ve çok sayıda diğer bitki, TNT (Trinitrotolüen) gibi bileşikler zararlı hale getiriyor. Radyoaktif maddeleri biriktiren bitkiler de var. Geçtiğimiz yıllarda Çernobil'deki bir havuzda, salların üzerine, kökleri suya doğru sarkacak biçimde dikilen ayçiçekleri, ortamda fazla miktarda bulunan sezyum 137 ve stronsiyum 90'ı toplamak için kullanıldı. Böylece suyun temizlenmesinin yanında, bitkiler daha kolay imha edilebilecek radyoaktif atığa dönüşmüş oluyor. Bu işlem, var olan en gelişmiş teknolojilere göre, bir metre küp başına 13 dolardan daha düşük bir fiyata mal oluyor.

Bu süreçler çoğu zaman daha karmaşık oluyor. Örneğin, çok miktarda kurşun içeren bir toprak parçasını ele alalım. Bu kurşunu normal

toprakta hiçbir bitki alamaz. Ancak, eğer toprağa kurşuna bağlanabilen bir madde bırakılırsa, sonuçta oluşan bileşik hint hardalı (*Brassica juncea*) tarafından kolayca alınır. Bunun uygulaması, New Jersey'de bir zamanlar akümülatör üretimi yapılan bir yerde yapılmış ve bir yaz boyu süren uygulamanın sonunda kurşunun hemen hemen tümü yok olmuş.

Maliyet bakımından bu işin sağlayacağı tasarruf ise insana çok çekici geliyor. Kirliliği, bölgeden temizle-

maliyeti 20 000 dolar oluyor ve daha önceki yöntemlere kıyasla temizlemenin maliyetini yılda 20 000-60 000 dolar arasında düşürüyor.

Bitkilerin kurtarıcılık yaptığı bir başka örnek durum da Iowa'da Indian Creek Doğa Merkezi'nde yaşandı. Bu merkezin her yıl 10 000'den daha az ziyaretçisinin olması beklenirken, bu sayının yılda 40 000'i bulması, atıksu sisteminin aşırı bir yük altına girmesine yol açmış. İki ırmağın kesişiminde bulunan ve taşkınların sık yaşandığı bu alanda sulak alan sistemleri kuruldu. Atıksular önce bir kanalizasyon sistemine giriyordu ve bundan sonra üç havuza uğruyordu. İlk iki havuz çakıllarla doluydu. Su yüzeye ulaşmıyordu, ancak sulak alan bitkileri köklerini kirli suyun içine doğru uzatıyordu. Çakıllar ve bitkilerden oluşan bu sistemler, lağım suyundaki bileşikler parçalayan bakteriler için uygun bir ortamın oluşmasına yardım ediyordu. Temizlenen

su üçüncü bir havuza giriyordu.

Buradaki durum görmeye değerdi. İlk havuzda büyük su kamışları ve sazlar vardı. İkincisinde yılanıyastığı, mavi ve sarı süsenler, suda yetişen bir tür muz, kardinal çiçeği gibi bitkiler vardı. Üçüncü havuzda ise, yine suda yetişen bir muz türü, yılanıyastığı, çuhaçiçeği ve başka türlerden çok sayıda bitki vardı. Kenarlarında ise, uzun saplı sarı çiçekler, aynısının yeşil yapraklı bir türü, mor çiçekli bitkiler, gök mavisi yıldızçiçeği ve çalılar vardı.

Bu projeler hâlâ deneysel aşamada. Ancak, suları çiçek tarlaları yardımıyla temizleme fikri mekanik yöntemlere göre daha çekici görünüyor.



Öndeki tanklarda bulunan mikroorganizmaların başlattığı temizleme işini, arkadaki tanklarda bulunan bitkiler sürdürüyor.

mek metre küp başına 10-100 dolara mal olabiliyor. Temizleme işlemini başka bir yere taşımak yoluyla yapmak ise bu maliyeti üç kat artırıyor.

İşin en çekici yönü, karmakansık bir sorun yumağının, sonunda yeşil bir bahçeye dönüşmesi. ABD'nde madenlerden etrafa sızan asitli suların, ırmaklara karışarak onların rengini turuncu ve kırmızıya dönüştürdüğü bölgeler olduğu belirlenmiş. Bu topraklarda asitlik oranı öyle yüksek oluyor ki balıklar ve su bitkileri ölebiliyor. Kömür sanayisi, asidi kireç gibi bazı kimyasal maddelerle temizlemek için günde 1 milyon dolardan daha yüksek bir harcama yapıyor. Ancak, bugünlerde ABD Madencilik Bürosu asit sızıntısı olan yerlerde yapay bataklıklarda su kamışı (*Typha latifolia*) yetiştirilmesini destekliyor. Böyle bir tesisin

Wiles, J.R. "Wastewater Problem? Just Plant a Marsh", *Smithsonian*, Haziran, 1997  
Çeviri: Zuhâl Özer