

## GÜNEŞ IŞIĞINA DAYALI YÖNTEMLERLE SULARDA MİKROORGANİZMA İNKTİVASYONU: DERLEME

*Sevil ÇALIŞKAN ELEREN\**

Alınma: 07.10.2016; düzeltme: 17.02.2017; kabul: 20.02.2017

**Öz:** Bu çalışma kapsamında, gelişmekte olan ülkelerin yanısıra gelişmiş ülkelerin de sorunu olan güvenilir içme suyu teminine olanak sağlayan güneş ışığı ile dezenfeksiyon (SODİS) sistemleri incelenmiştir. Bu kapsamda güneş ışığı ile dezenfeksiyon sistemlerinin mikroorganizma inaktivasyonundaki verimliliklerinin artırılmasına yönelik günümüze kadar yapılmış uygulamalar da değerlendirilmiştir. Bu inceleme neticesinde, dezenfekte edilecek olan suda bulunan organik ve inorganik bileşiklerin, sudaki çözülmüş oksijen konsantrasyonunun, ışık yoğunluğunun, ışığın kalitesinin, sıcaklığın, reaktör tiplerinin, mikroorganizma türlerinin ve türlerin büyüme safhalarının, güneş ışığı ile mikroorganizmaların inaktivasyonunu etkilediği tespit edilmiştir. Güneş ışığına dayalı diğer yöntemlerin (güneş ışığı+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, güneş ışığı+TiO<sub>2</sub>, güneş ışığı+Fe<sup>+2</sup>, güneş ışığı+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+Fe<sup>+2</sup>/Fe<sup>+3</sup>, güneş ışığı+TiO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) inaktivasyon verimini artırarak dirençli mikroorganizmaları inaktive etmede daha başarılı olduğu görülmüştür. Asya, Latin Amerika ve Afrika ülkelerinde oldukça yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerin, ülkemizde de Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz Bölgesi gibi güneş enerjisinin fazla olduğu bölgelerde, sağlıklı ve güvenilir içme ve kullanma suyu elde etmek amacıyla kullanılabilceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş ışığı radyasyonu, Güvenilir içme suyu temini, İçme suyu arıtma tesisleri, Dezenfeksiyon

### Microorganism Inactivation by Solar Based Processes In Water: A Review Study

**Abstract:** This paper reviews the researches carried out until today related to solar disinfection systems (SODİS) and applications to increase the efficiency of microorganism inactivation, which allows developing countries, as well as developed countries, to supply reliable drinking water to a large extent. The paper summarizes the factors affecting the solar inactivation of microorganisms such as organic and inorganic compounds, dissolved oxygen concentration, light intensity, light quality, temperature, reactor types, microorganism types and growth phases of species in the water to be disinfected. As a result of investigation of the literature, it has been determined that other solar based methods (solar light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solar light+TiO<sub>2</sub>, solar light+Fe<sup>+2</sup>, solar light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+Fe<sup>+2</sup>/Fe<sup>+3</sup>, solar light+TiO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) have been shown to be more successful for disinfection of the resistant microorganisms by increasing the efficiency of inactivation. As a result of this study, it can be recommended that solar based processes which are widely used in Asia, Latin America and Africa countries can be used to obtain healthy and reliable drinking and domestic water in Turkey, especially in the regions where solar energy is much higher such as Southeastern Anatolia and Mediterranean Region.

**Keywords:** Solar radiation, Supply safe drinking water, Drinking water treatment plants (DWTPs), Disinfection

## 1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve yaşanan iklim değişikliği etkileri nedeniyle hijyenik su temininde yaşanan sıkıntılar en önemli küresel problemlerden biri olmuştur ve bu sorun gelecek yıllarda daha da önem kazanacaktır. Gelişmekte olan ülkelerde, iyileştirilmiş içme suyu temini ile bir yılda yaşanan ishal vakalarının (3,5 milyar) %20-35 oranında önlenildiği ortaya konmuştur (Christen ve diğ., 2011). Güvenilir içme suyuna erişimin önemi, BM'nin (Birleşmiş Milletler)

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa  
İletişim Yazarı: Sevil Çalışkan Eleren (sceleren@uludag.edu.tr)

bin yıllık kalkınma hedefleri içinde yer alan 7c hedefinde belirtilmiştir. Bu hedefle güvenilir içme suyuna erişemeyen kişilerin sayısının yarıyarıya azaltılması öngörülmüştür. Bu hedefe genel anlamda ulaşılmış olup, 1990 ve 2015 yılları arasında 2,6 milyar kişinin temiz içme suyu kaynaklarına erişimi sağlanmıştır (Christen ve diğ., 2011; Kalt ve diğ., 2014). Ancak halen 780 milyonun üzerinde kişi güvenilir içme suyuna ulaşmamaktadır (Kalt ve diğ., 2014; Tsydenova ve diğ., 2015). Güvenilir içme suyuna erişimin sadece gelişmekte olan ülkelerin değil, gelişmiş olan ülkelerin de bir problemi olduğu, Fogden ve Wood (2009) tarafından yapılan çalışmadan da anlaşılmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, kişi başı gayrisafi yurtiçi hasıla büyümesine tekabül eden güvenilir içme suyuna erişebilirlik seviyesi, gelişmekte olan ülkelerde %21,3 civarında iken, gelişmiş ülkelerde bu oran sadece %52,4 seviyesinde kalmıştır (Fogden ve Wood, 2009).

Günümüzde yaklaşık 600 milyon kişi sürekli su sıkıntısı çekmekte, 1 milyardan fazla kişi de güvenilir içme suyuna erişimde sıkıntı yaşamaktadır. Bu sıkıntı gelişmekte olan ülkelerde dahi önemli oranda su kaynaklı hastalıkların (tüm hastalıkların % 80'inin) ortaya çıkmasını beraberinde getirmektedir. Bunun yanı sıra, tüm yüzeysel sularda olduğu gibi yeraltı su kaynaklarının da dünyanın pek çok yerinde aşırı kullanımının hızla arttığı açıkça görülmektedir. Dünya nüfusunun yaklaşık üçte biri tarafından kullanılan yeraltı su kaynaklarının su seviyeleri yılda yaklaşık 1-3 m kadar düşmektedir. Mevcut eğilimin bu hızla devam etmesi, 2025 yılında dünyanın üçte ikisinin su sıkıntısı çeken alanlarda yaşayacağını işaret etmektedir (Blanco ve diğ., 2009).

Nüfus artışına ve mevcut kaynakların giderek artan kirlenme riskine paralel olarak, talep edilen temiz su ihtiyacı da artmaktadır (Kalt ve diğ., 2014). Gelecekte yaşanması öngörülen enerji krizleri bağlamında, sağlıklı içme suyu sağlanması konusunda sorunların daha da kötüleşmesi beklenmekte ya da tam tersine, su ve enerji arasındaki yakın ilişkiden dolayı, su sıkıntısının enerji problemlerini arttıracığı beklenmektedir (Blanco ve diğ., 2009). Bu durumda gelişmekte olan ülkelerde içme suyunun son kullanıcıya sürekli olarak, yeterli kalite ve miktarda olduğu kadar, ekonomik bir şekilde iletilmesi de önem arz etmektedir (Kalt ve diğ., 2014; Ahsan ve diğ., 2014). Farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık brüt teorik yararlı potansiyeli, teknik potansiyeli, mevcut ekonomik potansiyeli ve kurulu güç açısından tahmini potansiyelleri değerlendirildiğinde, güneş enerjisinin bu ekonomik potansiyeli sağladığı görülmektedir (Blanco ve diğ., 2009). Tüm bu yüksek potansiyellerinin yanı sıra, kirlenmiş içme sularının verimli, ucuz ve basit bir şekilde dezenfekte edilmesine büyük ölçüde imkan sağladığından dolayı son yıllarda güneş ışığı ile dezenfeksiyon (SODİS), tanınan ve geçerli bir yöntem haline gelmiştir (Hara ve diğ., 2004). SODİS kullanımı kolay ve ucuz bir yöntem olduğu için, gelişmekte olan dünyada kabul görmüş olup, günümüzde Asya, Latin Amerika ve Afrika'da 50'den fazla ülke tarafından etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Davarcioğlu, 2015). 1980 yılından bu yana, suda güneş ışığı radyasyonu ile oluşan hücre ölümü mekanizmalarını ve bu alanda gelişen teknolojileri daha hızlı ve daha güvenilir hale getirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır (Davarcioğlu, 2015). Solar de Almeria Platformu'nda yapılan güneş ışığı ile dezenfeksiyon çalışmalarında, fotokatalik desteğiyle üretilen güçlü oksitleyiciler vasıtası ile güneş ışığının mikroorganizma inaktivasyonu veriminin daha da artırılabilceği ortaya konmuştur (Fernández-Ibáñez, 2007). Güneş ve güneşe dayalı foto-katalitik dezenfeksiyon işlemleri, sadece içme suyu (Boyle ve diğ., 2008; Sichel ve diğ., 2009; Gómez-Couso ve diğ., 2009) ve farklı su kaynaklarındaki (Polo-López ve diğ., 2010) çeşitli patojenlerin etkili şekilde inaktivasyonu açısından değil, aynı zamanda tarımsal sulama suyu için kullanılacak arıtılmış atıksuların mikrobiyal kalitesinin artırılması açısından da değerlendirilmiştir (Bichai ve diğ., 2012).

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye kıyasla şanslı durumdadır (Pharabod ve Philibert, 1991; Kılıç, 2015; Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009; Aksungur ve diğ., 2003). Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ)'nde mevcut bulunan 1966-1982 yılları arasında ölçülen güneşlenme süresi

ve ışınım şiddeti verileri yardımıyla Elektrik İşleri Etütü İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre, ülkemizin yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2640 saat ve ortalama toplam ışınım şiddeti ise 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl olarak hesaplanmıştır. Türkiye, 110 gün gibi yüksek bir enerji potansiyeline sahiptir (Varınca ve Gönüllü, 2006). Bu açılardan bakıldığında, güneş ışığı ile dezenfeksiyon metodu ülkemiz için önemli bir potansiyel teşkil etmektedir.

## 2. GÜNEŞ IŞIĞI İLE MİKROORGANİZMA İNAKTİVASYONU MEKANİZMASI

Güneş ışığı ile dezenfeksiyon sırasında mikroorganizmaların inaktive edilmesi, termal ve optik inaktivasyonun sinerjistik etkileri yoluyla sağlanır (Wilson, 2010).

**Termal İnaktivasyon:** Güneş enerjisinin su tarafından absorblanması dolayısı ile sıcaklık artar. Eğer yeteri kadar yüksek sıcaklık (tipik olarak 60 °C) belirli bir süre için korunursa, dezenfeksiyon meydana gelebilir. Joyce ve diğ. (1996) yüksek bulanıklığa sahip sularda (> 200 NTU) tam bir dezenfeksiyonun sağlanması için, suyun 7 saat 55 °C' ye ulaşması koşuluyla güneş ışığına maruz kalması gerektiğini belirtmişlerdir. Suyun yüksek bulanıklığı ve düşük geçirgenliğinden dolayı UV inaktivasyon mekanizmasının dezenfeksiyonda ihmal edildiği belirtilmiştir. Güneş ışığı ile dezenfeksiyonda, çok bulanık örneklerde güneş ışığının su içerisine girmesi minimum olur. 200 NTU'dan daha yüksek bulanıklığa sahip su örneklerinde, toplam UV ışığının %1'den daha azı 2 cm derinliğe kadar nüfuz edebilir. Bu nedenle bu mesafeyi aşan hacimlerde önemli mikroorganizma öldürücü etkisi beklenmemelidir (Joyce ve diğ., 1996). Güneş ışığına maruziyet sonucunda, bulanık olan örnekler, bulanık olmayan örneklerle karşılaştırıldığında suda daha yüksek sıcaklıkların kaydedildiği dikkat çekmektedir. Bunun nedeninin, bulanıklık yaratan partiküller tarafından güneş radyasyonunun absorpsiyonu sonucu olduğu belirtilmiştir. Güneş ışığının kendi etkisinden çok güneş ışığının absorpsiyonu sonucu suyun sıcaklığının artması nedeniyle inaktivasyonun gerçekleştiği belirtilmiştir (Kehoe ve diğ., 2001).

**Optik İnaktivasyon:** Güneş ışığı ile inaktivasyon, optik ve termal enerjinin sinerjistik mekanizması yolu ile meydana gelmektedir (Byrne ve diğ., 2011). Optik inaktivasyon, güneş ışığının UV ve görünür ışık spektrumları ile sağlanan inaktivasyondur (McGuigan ve diğ., 1998). İsviçre Federal Çevre Bilim ve Teknolojisi Enstitüsü (EAWAG) çeşitli coğrafi bölgelerde yaptıkları alan çalışmalarında, güneş enerjisi metodu ile dezenfeksiyonda suyun nadiren 50°C nin üzerine çıktığını tespit etmişlerdir (Berney ve diğ., 2006a). Bu tespitlere dayanarak, 50°C nin altındaki sıcaklıklarda, etkin dezenfeksiyon mekanizmasının optik veya UV inaktivasyon mekanizması olduğu söylenebilir.

Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi spektrumu, ozon tabakasının UVC spektrumunu filtrelemesi nedeniyle 295 nm ve yukarı dalga boylarını kapsayan çok geniş bir radyasyon aralığını kapsamaktadır (Mamane ve diğ., 2007; Wilson, 2010). Bir çok araştırmacı tarafından güneş ışığı ile radyasyondan sorumlu spektrumların, UVB (290-320 nm), UVA (320-400 nm) ve görünür ışık (> 400 nm) radyasyonu olduğu ileri sürülmüştür (Wegelin ve diğ., 1994; McGuigan ve diğ., 1998; Dejung ve diğ., 2007; Mamane ve diğ., 2007; Wilson, 2010).

UVB radyasyonu güneş ışığı spektrumunun küçük bir kısmı olmasına rağmen mikroorganizmalarda çok fazla metabolik etkiye sahiptir. UVB dalga boyu aralığında önerilen mikrobiyal inaktivasyonun iki olası mekanizması vardır; (a) direkt fotoliz (dimer üretimi), (b) hücre içi reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi vasıtasıyla doğal olarak meydana gelen indirekt oksidatif hasardır. Reaktif oksijen türleri; süperoksit radikali, hidroksil radikali, hidrojen peroksit, peroksil ve peroksinitrittir. Bu türler oldukça kısa ömürlüdür ve stabil değildir. Hücrelerde, lipid peroksidasyonu, DNA zincir kırılmalarına ve oksidatif hasara neden olabilir. UVB radyasyonu altında ROS oluşumu, UVB dozuna bağlıdır ancak orantılı değildir. Yüksek UVB dozlarında, primidin dimerlerinin ve diğer öldürücü fotoürünlerin oluşumu direkt hücre ölümü ile sonuçlanır (Mamane ve diğ., 2007). Bu dimerlerin oluşumu, gen sentezlenmesini değiştirir ve DNA replikasyonunu inhibe eder, bu da genetik mutasyona neden olur (Helali ve diğ., 2014; Britt, 1996).

Acra ve diğ. (1990), güneş ışığı spektrumunun UV-A ve bir kısım görünür ışık dalga boylarının (320-450 nm), DNA'da zincir kırılmalarına ve baz değişikliklerine neden olan ROS'ları oluşturabildiğini rapor etmişlerdir. Bu toksik reaktif oksijen türleri, protein sentezini (proteinlerdeki aminoasitlerin oksidasyonunu) bozabilir, lipitlerde doymamış yağ asitlerinin oksidasyonuna neden olabilir ve mikroorganizmaların inaktivasyonuna katkıda bulunmak için bakteriyel hücrelere saldırıda bulunabilirler (Helali ve diğ., 2014; McGuigan ve diğ., 2012). Endojen kromofomlar olarak bilinen hücre bileşenleri (FAD, NAD ve quinonlar gibi) tarafından absorplanan UVA fotonları hücre içine girer. Eğer bu foto uyarılmış kromofomlar temel seviyedeki moleküler oksijen ile temas ederse, ROS oluşumu meydana gelir. ROS seçici olmayıp hücre membranı, enzimler ve organeller gibi pek çok hücre bileşeni ile reaksiyona girer. (Helali ve diğ., 2014; Heorter ve diğ., 2005; Chamberlain ve Moss, 1987; Dejung ve diğ., 2007).

Wegelin ve diğ. (2002), 30 °C su sıcaklığı ve 555 Wh/m<sup>2</sup> (350-450 nm) dozundaki güneş ışığına (yaz güneş ışığında yaklaşık 6 saat) maruz kalan fekal koliform bakterilerinde 3 log giderimin sağlandığını belirtmişlerdir. Güneş ışığına maruz kalan fekal koliform bakterilerin ölüm hızının, UVA radyasyonu ve artan su sıcaklığı ile önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir. Öyle ki su sıcaklığı 50 °C olduğunda, UVA radyasyonu ve sıcaklık, sinerjistik etki meydana getirerek 3 log fekal koliform giderimi için yalnızca 140 Wh/m<sup>2</sup> (350-450 nm) ışık dozunun yeterli olduğunu belirtmişlerdir (Wegelin ve diğ., 2002).

### 3. GÜNEŞ IŞIĞI İLE MİKROORGANİZMA İNAKTİVASYONUNA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Güneş ışığı ile dezenfeksiyonu etkileyen pek çok faktör vardır. Bu faktörler genel olarak, dezenfekte edilecek olan suda bulunan organik ve inorganik bileşikler, sudaki çözünmüş oksijenin varlığı gibi kimyasal özellikler; ışığın kalitesi, yoğunluğu, sıcaklık, reaktör tipi vb. gibi fiziksel özellikler ve mikrobiyal özellikler şeklinde sınıflandırılabilir.

Su matriksi içerisinde SODİSi önemli derecede etkileyen iki içerik mevcuttur;

i) askıda partiküller

ii) ışığı absorplayan çözünmüş materyaller.

Askıda partiküller bulanıklığa katkıda bulunan ana faktördür ve ışığı etkili şekilde absorplayabilir veya partiküllerle temas eden ışınlar dağılabilir. Bu durumda ışınlama absorplanırsa etkili şekilde kaybolurken, dağılan ışınlama kaybolmaz sadece yönlendirilir. Suda ışık dağılımının etkilerine ilave olarak, büyük askıda partiküller (1-10 µm) mikroorganizmalara kalkan görevi görür ve etkili dezenfeksiyonu sınırlandırabilir (Wilson, 2010).

#### 3.1. Bulanıklık

Bulanıklık 300 NTU civarına yükseldiğinde, bakteriyel inaktivasyon azalır. Bulanık sular (>200 NTU) askıda katı maddelerin varlığı nedeniyle görünür ve infrared radyasyonu (IR) ışınlarını absorplar. Güneş ışığına maruziyet sonucunda, bulanık olan örnekler, bulanık olmayan örneklerle karşılaştırıldığında suda daha yüksek sıcaklıkların kaydedildiği dikkat çekmektedir. Bunun nedeninin, bulanıklık yaratan partiküller tarafından güneş radyasyonunun absorpsiyonu sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle güneş ışığının kendi radyasyon etkisinden çok güneş ışığının absorpsiyonu sonucu suyun sıcaklığının artması nedeniyle inaktivasyonun gerçekleştiği belirtilmiştir (Kehoe ve diğ., 2001). Bundan dolayı bulanık sularda mikroorganizma dezenfeksiyonunun yalnızca termal etkiden dolayı olduğu rapor edilmiştir (Acra ve diğ., 1990; Wegelin ve diğ., 1994; Kehoe ve diğ., 2001; Joyce ve diğ., 1996; Ndounla ve diğ. 2013; Ubomba-Jaswa ve diğ., 2009; Dunlop ve diğ., 2011; Byrne ve diğ., 2011; Sciacca ve diğ., 2010).

#### 3.2. Organik Bileşikler (hümik asitler vb.)

Işık absorplayan çözünmüş maddelerin ana bileşeni, hümik maddelerdir. Hümik maddeler yüzeysel sularda organik maddelerin %50'sini oluşturur. Doğal organik maddeler üç ana

bileşene ayrılabilir; fülvik asitler, hümkik asitler ve hüminler (Wilson, 2010). Organik bileşiklerin çift yönlü etkisi vardır; a) Fotosensiziter olarak görev görebilir ve ROS üretiminden dolayı güneş ışığı ile dezenfeksiyonu arttırabilir, b)güneş ışınlarını absorlayabilir ve bu yüzden optik inaktivasyonu arttırabilir (Davies ve Evison, 1991). Cantwell ve diğ. (2008) hümkik maddelerin mikroorganizmaları kapladığını ve onları zararlı etkilerden koruduğunu belirtmişlerdir.

### **3.3.İnorganik Bileşikler (yüksek tuz konsantrasyonu vb.)**

Güneş ışınları ile sinerjistik olarak davranır ve dolaylı olarak hücre membranının hasarına yol açarak mikroorganizma inaktivasyonunu arttırır (Vicars, 1999).

### **3.4.Çözünmüş Oksijen**

Çözünmüş oksijenin varlığında, güneş ışığı ile dezenfeksiyon verimi, ROS üretimi ile fotooksidasyon nedeniyle önemli oranda arttırılır (Reed ve diğ., 2000)

### **3.5.Sıcaklık**

40-50 °C nin üstündeki sıcaklıklarda termal ve optik inaktivasyonun sinerjistik etkisi gözlenir (Wegelin ve diğ., 1994; Ndounla ve diğ. 2013; Byrne ve diğ., 2011; Sciacca ve diğ., 2010; Oates ve diğ., 2003).

### **3.6.Reaktör Tipi ve Malzemesi**

Güneş ışığı ile dezenfeksiyon için kollektörün UVA geçirgenliği çok önemlidir. PET şişe veya daha geniş çaplı uygulamalar için quartz tüpler en uygun malzemelerdir (Acra ve diğ., 1984, 1990). Reaktör dizaynında göz önüne alınması gereken en önemli iki nokta akış hızı ve solar radyasyon dozudur. Ancak ulaşılan ışık yoğunluğu etkilenemeyeceği için, aydınlanma süresi ve akış hızları değiştirilerek istenen etki sağlanabilir.

### **3.7.Hava Şartları ve Konum**

SODİS için en uygun bölgeler 15° ile 35° kuzey enlemleri arasındadır (Acra ve diğ., 1990; Caslake ve diğ., 2004; Oates ve diğ., 2003)

### **3.8.Mikroorganizma türü ve büyüme safhası**

Güneş ışığı ile pek çok mikroorganizma türü inaktive edilebilmektedir. İnaktivasyon verimi, mikroorganizma türüne göre değişim göstermektedir. Farklı mikroorganizma türlerinin güneş ışığı ile dezenfeksiyona karşı dirençleri de farklıdır. Bakteriler ile karşılaştırıldığında virüsler için iki kat fazla güneş ışığı dozu gereklidir. Fungilerde ışınlanan türlere bağlı olarak inaktivasyon için 3-6 saat arası süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Sistler ise 56 °C de 10 dakika içinde termal etki ile inaktif hale getirilebilir (Acra ve diğ., 1984; Wegelin ve diğ., 1994). Mikroorganizmanın büyüme safhası da inaktivasyon verimini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biridir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, patojen bakterilerin, uygun saha koşullarında (hava durumunun etkili olmasından dolayı) 6 saat güneş ışığından hızla etkilendiği bulunmuştur (Wegelin ve diğ., 1994; Dejung ve diğ., 2007). Bununla birlikte, doğal oluşumlu fekal koliformların bazı durumlarda inaktivasyon hızının oldukça yavaş olduğu görülmüştür (Wegelin ve diğ., 1994; Sinton ve diğ., 2002). Spor oluşturan bakterilerin inaktivasyonunun çok daha zor olduğu ve 16 saat etkili güneş ışığında (doğal güneş ışığının %96,3 kadar) bile 1,3 log giderim gerçekleştiği bulunmuştur (Boyle ve diğ., 2008) Yapılan çalışmalar, viral patojenlerin güneş ışığına karşı en dayanıklı türler olduğunu göstermiştir. Rincon ve Pulgarin (2004a) yaptıkları çalışmada, mikroorganizmaların saf kültür ve doğal olarak ortamda bulunan mikroorganizmalar ile yapılan çalışmalarda direnç farklılıklarının gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

#### 4. GÜNEŞ IŞIĞINA DAYALI HOMOJEN VE HETEROJEN KOMBİNE PROSESLER İLE MİKROORGANİZMA İNAKTİVASYONU

SODİS prosesinin etkinliği, maliyeti fazla arttırmaksızın önemli ölçüde geliştirilebilir. Bunun için heterojen fotokatalitik, homojen fotofenton veya hidrojen peroksit ile kombine prosesler kullanılır (Polo Lopez ve diğ., 2011).

Yarı iletken fotokataliz (güneş ışığı/TiO<sub>2</sub> vb.) yöntemi, patojenik mikroorganizmaları inaktive etmek amacıyla yüksek oksidatif türler üretmek için bir yarı iletken materyal (TiO<sub>2</sub>, ZnO, ZrO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SnO<sub>2</sub> vb.) ile ışığın birlikte kullanıldığı proseslerdir. Fotokatalitik yöntemi güneş ışınlarının kullanılabilirdiği gelişmekte olan bölgelerde, suyun dezenfeksiyonu için basit ve düşük maliyetli bir çözümdür. En çok kullanılan ve üzerinde en fazla araştırma yapılan TiO<sub>2</sub> fotokatalizinin bakteriyel inaktivasyon etkisi, hidroksil radikali (OH•) ve diğer reaktif oksijen türlerinin üretimine dayanmaktadır (Cho ve diğ., 2004; Huang ve diğ., 2000). Bir grup araştırmacı tarafından, reaktif oksijen türlerinin ilk atak yaptığı yerin hücre zarı olduğu ve bunun da lipid peroksidasyonuna neden olduğu belirtilmiştir (Kiwi ve Nadtochenko, 2005). Hücre membranının hasarı ve daha sonra oksidatif türlerin hücre içi bileşenlere saldırısının ortak etkisi sonucunda hücre ölümü gerçekleşir (Rincon ve diğ., 2004b). Diğer bir gruba göre ise, Koenzim A' nın fotooksidasyon reaksiyonları, hücre solunumunun inhibisyonuna, dolayısı ile hücre ölümüne neden olur (Vohra ve diğ., 2005). Fotokatalitik yöntem ile dezenfeksiyonu; sıcaklık, ışık yoğunluğu, dezenfeksiyon süresi, bulanıklık, ışığın uygulanma formu (kesikli veya sürekli olarak), TiO<sub>2</sub>' in yapısı (rutil, anataz), TiO<sub>2</sub> konsantrasyonu ve TiO<sub>2</sub>' in sabitlenmiş veya partikül formunda uygulanması gibi faktörler etkiler.

Literatürde, fenton ve fotofenton proseslerine daha çok, toksik maddelerin giderimi çalışmalarında rastlanmakla birlikte, son yıllarda klasik dezenfeksiyon yöntemlerine alternatif olarak kullanılacak güneş ışığının fotofenton prosesi ile kullanıldığı dezenfeksiyon çalışmalarında da sıklıkla yer verilmektedir (Gómez-Cousao ve diğ., 2009). Fe<sup>+2</sup>/güneş ışığı sisteminde fotokatalitik inaktivasyon mekanizması süresince Fe<sup>+2</sup> iyonlarının bakteriyel etkisi, Fe<sup>+2</sup> iyonlarının hücre içine difüzyon yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Difüze olan Fe<sup>+2</sup> iyonları, metabolik H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile reaksiyona girdiğinde hücre içi Fenton reaksiyonları yolu ile OH• (hidroksil radikali) üretimine yol açar (Ndounla ve diğ., 2013; Imlay, 2008; S. Jang ve Imlay, 2010). Elde edilen OH•, DNA, hücre membranları ve proteinleri oksitleme potansiyeline sahiptir (Halliwell ve Gutteridge, 1999). Ayrıca, fenton ve fenton benzeri mekanizmada, hidroksil radikallerinden daha reaktif türlerin de (örn., (FeO)<sup>+2</sup> gibi bir Fe (IV) türü) üretebileceği ve bunların da hücreleri inaktive etme potansiyeline sahip türler olduğu ileri sürülmüştür (Fridovich, 1998; Hug ve Leupin 2003; Sharpe ve diğ., 2003).

Solar/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> prosesinde, güneş ışığı ve düşük konsantrasyonda hidrojen peroksit kullanılmasıyla düşük maliyetli bir dezenfeksiyon prosesi elde edilir. Bu prosede inaktivasyon, direkt fotoinaktivasyon, içsel fenton ve Haber-Weiss reaksiyonları ve UVA radyasyonu baskısı altında meydana gelen katalaz ve süperoksit dismutaz inaktivasyonu şeklinde meydana gelir. Katalaz ve süperoksit dismutaz inaktivasyonu, hücre içinde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> artışına sebep olur. İçsel fenton ve Haber-Weiss reaksiyonlarında ise, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> moleküllerinin membran difüzyonu sonucu, hücre içi konsantrasyon artar. Sonrasında bu moleküller, hücre içi serbest ve kolay ayrılabilen demir ile Haber-Weiss reaksiyonları sonucu hidroksil radikali oluştururlar (Agulló-Barcelo ve diğ., 2013).

Günümüze kadar çeşitli su kaynakları ve içme sularında mikroorganizma giderimi için uygulanan güneş ışığı ve güneş ışığına dayalı kombine proseslerin literatür özeti Tablo 1'de verilmiştir.

İnsan ve hayvansal atıklar nedeniyle kirlenmiş sular vasıtası ile ortaya çıkan hastalıkların asıl nedeni enterik mikroorganizmalardır. Suda yaygın olarak bulunan mikroorganizma grubu ise fekal koliformlardır (10<sup>3</sup>-10<sup>8</sup> CFU/100ml)(Tchobanoglous ve diğ., 2004) ve bunların varlıkları kontaminasyon seviyesinin bir göstergesidir (Fernández-Ibáñez, 2007). Bu grubun içerisinde yer alan *E.coli*, diğer bakterilere göre güneş ışığının bakterisidal etkilerine karşı olan

direnci, fekal indikatör olarak yaygın kullanımı (Kehoe ve diğ., 2001, Wegelin ve diğ., 1994) ve DNAsı, metabolizması, yapısı, bileşenleri, morfolojisi, farklı nutrient ortamlarındaki davranışları, türleri gibi pek çok açıdan çok iyi biliniyor olmasından (Fernández-Ibáñez, 2007) dolayı model organizma olarak literatürde çok fazla çalışılmıştır. Bunun yanı sıra hastalıklara neden olan diğer organizma türlerinde de güneş ışığının etkisini gösteren çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Güneş ışığı ile dezenfeksiyon yöntemi, 1991 yılından bu yana EAWAG' a bağlı araştırmacılar tarafından gerek laboratuvar gerekse saha çalışmalarında denenmiş ve geliştirilmiştir. Günümüzde de Asya, Latin Amerika ve Afrika'da 50'den fazla ülke tarafından uygulamaları yapılmaktadır (Davarcioglu, 2015; Meierhofer ve Wegelin, 2002).

1994-2016 yılları arasında doğal güneş ışığı ve yapay güneş simülatörü ile ilgili çalışmalar yürütüldüğü, son yıllarda ise özellikle yarı iletken fotokataliz yöntemi, solar/fotofenton ve solar/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> yöntemi ile ilgili çalışmalara daha fazla önem verildiği görülmektedir.

Güneş ışığı ile sulardan hastalık yapıcı mikroorganizmaların giderimi üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde, doğal oluşumlu fekal koliformların inaktivasyon hızının, saf kültürlerle karşılaştırıldığında oldukça yavaş olduğu görülmektedir ( McGuigan ve diğ., 2012; Sommer ve diğ., 1997; Sinton ve diğ., 2002) Yapılan çalışmalar, viral patojenlerin güneş ışığına karşı en dayanıklı tür olduğunu göstermiştir. Yine spor oluşturan bakterilerin inaktivasyonunun da daha zor olduğu görülmüştür. Özellikle güneş enerjisi ve sıcaklığın sinerjistik etkisinin Giardia sistleri üzerinde önemli oranda dezenfeksiyon etkisi olduğu tespit edilmiştir (Mohamed ve diğ., 2014).

Benabbou ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada, yarı iletken olarak TiO<sub>2</sub>' in kullanıldığı uygulamalarda optimum dozun belirlenmesinin gerektiğini, aksi takdirde TiO<sub>2</sub> partiküllerinin oluşturduğu bulanıklığın inaktivasyonu olumsuz yönde etkileyeceğini belirtmişlerdir. Son yıllarda TiO<sub>2</sub> ile ilgili bu problemin önüne geçebilmek için TiO<sub>2</sub> kaplı reaktörler veya levhalar kullanılmaya başlanmıştır (Mendez Hermida ve diğ., 2007; Gomez-Cuosa ve diğ., 2009; Lonnen ve diğ., 2005).

Enterik bakteriler (Ndolunla ve diğ., 2013), Salmonella (Ndolunla ve diğ., 2014), funguslar (Garcia Fernandez ve diğ., 2012) ve sporlar (Polo-Lopez ve diğ., 2010) gibi güneş ışığına dirençli olan mikroorganizmaların inaktivasyonu için güneş ışığı ile birlikte TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve/veya Fe<sup>+3</sup> ilavesinin inaktivasyon verimini önemli miktarda arttırdığı belirlenmiştir.

Güneş ışığı ile arıtım prosesinden sonra suyun kullanıma sunulmadan önce depolanması sırasında, mikroorganizmaların popülasyonunun izlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü suda doğal olarak varolan organik maddeler veya bakteriyel hücrelerin fotooksidasyonu nedeniyle tahribatından dolayı oluşan yan ürünler, karanlıkta suyun depolanması sırasında mikroorganizmaların tekrar üremesini teşvik edebilir (Gomes ve diğ., 2009). Bunu önlemek için yarı iletken materyaller (Rincon ve diğ., 2007a,b; Gelover ve diğ., 2006) kullanılabilir. Yarı iletken materyaller askıda halde kullanılabilir veya yarı iletken materyalin kaplı olduğu reaktör veya levhalar ile dezenfeksiyon işlemi yapılır. Eğer yarı iletken materyaller askıda halde kullanılacak ise, dezenfeksiyon işleminin hemen öncesinde suya eklenir ve dezenfeksiyondan sonra yarı iletken materyaller sudan uzaklaştırılıp geri kazanılır (Bryne ve diğ., 2011; Hernández-Ramírez ve Medina-Ramirez, 2015), Yarı iletken materyaller bağlı halde (immobilize) kullanılacak ise yarı iletken ile kaplanmış reaktör veya levhalar (borosilikat camlar, ITO camlar vb.) dezenfeksiyon işlemi sırasında kullanılır (Bryne ve diğ., 2011; McGuigan ve diğ., 2012). Yarı iletken materyallerin yanı sıra H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesinin de inaktivasyondan sonra mikroorganizmaların yeniden çoğalmasını önlediği (Ndolunla ve diğ., 2014; Spuhler ve diğ., 2010) ve inaktivasyon verimini arttırdığı literatürden bilinmektedir (Ndolunla ve diğ., 2014; Spuhler ve diğ., 2010; Polo-Lopez ve diğ., 2010; Garcia Fernandez ve diğ., 2012; Sichel ve diğ., 2009; Çalışkan Eleren ve diğ., 2014). Pek çok araştırmacı, güneş ışığı ile inaktivasyon çalışmalarında H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile, dayanıklı türlerin inaktivasyonunun da gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir (Ndolunla ve diğ., 2014; Polo-Lopez ve diğ., 2010; Garcia

Fernandez ve diğ., 2012; Sichel ve diğ., 2009). H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve güneş ışığının sinerjistik etkisi, gelişmekte olan ülkelerdeki arazi uygulamalarında, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>' nin kullanılabilirliği açısından değerlendirilebilir. Ancak insani tüketim amacıyla kullanılacak sularda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>' in oluşturabileceği uzun vadeli sağlık problemleri hakkındaki endişeleri gidermek için uygun H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarının kullanılmasına dikkat edilmelidir. Özellikle Fe<sup>+3</sup> içeriğine sahip kuyu suları ve doğal sularda güneş ışığının yanısıra sadece H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesinin yeterli olduğu, Fe<sup>+3</sup> ilavesinin gerekli olmadığı belirtilmiştir. Bu da tropik veya güneş ışığının verimli olduğu kırsal veya yarı kentsel bölgelerde, güneş ışığı+fotokatalitik dezenfeksiyon uygulamasının gelecek vadede ucuz ve etkili bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

**Tablo 1. Güneş ışığı ve güneş ışığına dayalı proseslerle mikroorganizma giderimi (literatür özeti)**

Solar Dezenfeksiyon Prosesi	Mikroorganizma Türü	Işık Kaynağı	Literatür
Sadece Güneş Işığı	<i>E.coli</i> (vahşi tür)	Yapay güneş ışığı	McGuigan ve diğ., 1998
	<i>E.coli</i>	Yapay güneş ışığı	Keohe ve diğ., 2001
	<i>E.coli</i> K-12	Güneş ışığı simülatörü	Rincón ve Pulgarin, 2003
	<i>E.coli</i> (ATCC 11775)	Güneş ışığı	Mani ve diğ., 2006
	<i>E.coli</i> (MG1655)	Güneş ışığı ve UVA radyasyonu	Berney ve diğ., 2006
	<i>E.coli</i> (vahşi tür)	Güneş ışığı	Dejung ve diğ., 2007
	<i>E.coli</i> O157	Güneş ışığı	Boyle ve diğ., 2008
	<i>E.coli</i> K-12 (ATCC 23631)	Güneş ışığı	Navntoft ve diğ., 2008
Sadece Güneş Işığı	<i>E.coli</i> (vahşi tür) K-12 MG1655	UVA radyasyonu	Bosshard ve diğ., 2010
	<i>E.coli</i> K-12 (ATCC 23631)	Yapay güneş ışığı	Dunlop ve diğ., 2011
	<i>E.coli</i> K12 (ATCC 23631)	UVA radyasyonu	Polo-López ve diğ., 2011
	<i>E. coli</i> ( <i>E. coli</i> ) K12 MG1655	Doğal güneş ışığı	Fisher ve diğ., 2012
	<i>E.coli</i>	Güneş ışığı	Nalwanga ve diğ., 2014
	<i>E.coli</i>	UVA radyasyonu	Kalt ve diğ., 2014
	<i>E.coli</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Güneş ışığı	Deller ve diğ., 2006
	Fekal koliform	Güneş ışığı	Reed ve diğ., 2000
	<i>E.coli</i>	UVA radyasyonu	Khaengraeng ve Reed, 2005
	<i>Cryptosporidium parvum</i> oosistleri	Güneş ışığı	Mendez-Hermida ve diğ., 2005
	<i>Bacillus subtilis</i> sporları	UVB radyasyonu	Riesenman ve Nicholson, 2000
	<i>Salmonella typhimurium</i> , <i>E.coli</i> , <i>Shigella flexneri</i> , <i>Vibrio cholerae</i>	Güneş ışığı	Berney ve diğ., 2006
	Fekal koliform	Güneş ışığı	Mahvi, 2007
	<i>E.coli</i>	Güneş ışığı simülatörü	Wegelin ve diğ., 1994
	<i>E.coli</i>	Güneş Işığı+sıcaklık, UVA	Berney ve diğ., 2006
	<i>E.coli</i>	UVA,UVB	Muela ve diğ., 2000
	Sadece Güneş Işığı	<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> enteropatogenik <i>E.coli</i> , <i>Staphylococcus epidermis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> sporları	Doğal güneş ışığı
<i>Bacillus subtilis</i> sporları, <i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella enteritidis</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>P. Aeruginosa</i> , <i>Enterococcus faecalis</i>		Doğal güneş ışığı	Dejung ve diğ., 2007
<i>Poliovirus</i> , <i>echovirus</i> , <i>coxsackievirus</i> , <i>E. Coli</i> , <i>E. faecalis</i>		Güneş ışığı	Fujioka ve Yoneyama 2002
<i>Cryptosporidium parvum</i>			Gomez- Couso ve diğ., 2009
<i>Giardia duodenalis</i> , <i>Entamoeba histolytica/dispar</i>		Güneş ışığı	Mtapuri-Zinyowera ve diğ., 2009
<i>E.coli</i> , <i>Enterococcus faecalis</i>		Doğal güneş ışığı + O <sub>2</sub> üreten film	Manjon ve diğ., 2008
<i>Phage MS2</i> (DSMZ 3767) ve <i>X174</i>		Güneş ışığı simülatörü	Carratalà ve diğ., 2016
<i>Enterococci and Escherichia coli</i>	UVB radyasyonu	Maraccini ve diğ., 2016	



**Tablo 1(devamı). Güneş ışığı ve güneş ışığına dayalı proseslerle mikroorganizma giderimi (literatür özeti)**

Yarı İletken Fotokataliz Yöntemi	<i>E.coli</i>	Güneş Işığı+TiO <sub>2</sub> fotokatalisti	Zhang ve diğ., 1994
	<i>E. coli</i>	Güneş ışığı +TiO <sub>2</sub> film tabakası	Belpurkar ve diğ., 2006
	<i>E.coli</i>	UVA,UVB+TiO <sub>2</sub>	Benabbou ve diğ., 2007
	<i>E.coli</i> K-12	Güneş Işığı /TiO <sub>2</sub> , Güneş Işığı /TiO <sub>2</sub> /Fe <sup>+3</sup> , Güneş Işığı / Fe <sup>+3</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Güneş ışığı	Rincón ve Pulgarin, 2007
	<i>E.coli</i>	UVA +TiO <sub>2</sub> film	Kim ve diğ., 2008
	<i>E. coli</i>	Doğal güneş ışığı +TiO <sub>2</sub> film	Helali ve diğ., 2014
	<i>E. coli</i> K12 (TISTR 780)	Güneş ışığı +TiO <sub>2</sub> film tabakası	Nararom ve diğ., 2015
	<i>E.coli</i> (ATCC 25922)	Güneş ışığı +TiO <sub>2</sub> film tabakası	Yoriya ve diğ., 2016
	<i>E.coli</i> K12 (ATCC 23716)	Güneş ışığı simülatörü+TiO <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2004
	<i>E.coli</i> K12	Güneş ışığı simülatörü+TiO <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2003
	<i>E.coli</i>	Doğal güneş ışığı + TiO <sub>2</sub>	Sichel ve diğ., 2007
	<i>E.coli</i> K12	UVA ve UVB+ TiO <sub>2</sub>	Benabbou ve diğ., 2007
	<i>Cryptosporidium parvum oosistleri</i>	Doğal güneş ışığı + TiO <sub>2</sub>	Mendez-Hermida ve diğ., 2007
	<i>E.coli</i> K12	Güneş ışığı simülatörü+TiO <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2004
	Fekal koliform, toplam koliform	Doğal güneş ışığı + TiO <sub>2</sub>	Gelover ve diğ., 2006
	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>E.coli</i>	Doğal güneş ışığı + TiO <sub>2</sub>	Gomes ve diğ., 2009 b
<i>Acanthamoeba polyphaga</i> (protozoa), <i>Candida albicans</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>E.coli</i>	Güneş ışığı simülatörü+ TiO <sub>2</sub>	Lonnen ve diğ., 2005	
Solar fotofenton ve Solar/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Yöntemi	<i>E.coli</i> K-12 (ATCC 23716)	Güneş ışığı simülatörü+ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Güneş ışığı simülatörü+ TiO <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2004c
	<i>E.coli</i> K-12 (ATCC 23716)	Güneş ışığı simülatörü+ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2006a
	<i>E.coli</i>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ve the foto-Fenton sistemi (Fe <sup>+2</sup> veya <sup>+3</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /hv)	Spuhler ve diğ., 2010
	<i>E.coli</i> , <i>Salmonella spp.</i> , toplam koliform	Güneş ışığı, Fe <sup>+2</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , güneşışığı/ Fe <sup>+2</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , güneşışığı/ Fe <sup>+2</sup> ,	Ndounla ve diğ., 2013
	<i>E.coli</i> , <i>Salmonella spp.</i>	Fotofenton metodu (Fe <sup>+2</sup> , <sup>+3</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / güneş ışığı)	Ndounla ve diğ., 2014
	<i>E.coli</i>	UV <sub>vis</sub> / TiO <sub>2</sub> , UV <sub>vis</sub> / TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , UV <sub>vis</sub> / Fe <sup>+3</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , UV <sub>vis</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2006
	<i>S. mutans</i>	Güneş ışığı + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Feurstein ve diğ., 2006
	<i>E.coli</i> , <i>B.subtilis</i>	Güneş ışığı + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Çalışkan Eleren ve diğ., 2014
	<i>E.coli</i> K12	Doğal güneş ışığı/TiO <sub>2</sub> , Doğal güneş ışığı/TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Rincón ve Pulgarin, 2007
	<i>Fusarium solani sporları</i>	Güneş ışığı+ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Polo-Lopez ve diğ., 2011
	<i>F.solani</i> ve <i>E.coli</i>	Güneş ışığı/ Fe <sup>+3</sup> , Güneş ışığı/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Güneş ışığı/ Fe <sup>+3</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Garcia-Fernandez ve diğ., 2012
	<i>Fusarium solani</i>	Doğal güneş ışığı+ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Sichel ve diğ., 2009
	<i>E.coli</i> K-12 (ATCC 23716)	Güneş ışığı + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Fe <sup>+3</sup>	Moncayo-Lasso ve diğ., 2009

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güneş ışığı ile çeşitli su kaynaklarındaki hastalık yapıcı patojen mikroorganizmaların dezenfeksiyonu ile ilgili günümüze kadar yapılmış olan çalışmalar; güneş ışığının pek çok mikroorganizma türünü (bakteri, virüs, mantarlar ve protozoa) inaktive etmede başarılı olduğunu göstermiştir. Ancak mikroorganizmaların, güneş ışığına karşı gösterdiği dirençler farklıdır. Bu nedenle son yıllarda, güneş ışığı ile dezenfeksiyon proseslerinin verimliliğini önemli ölçüde arttırmak için güneş ışığı ile birlikte H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve/veya fotokatalitik yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalar, dirençli mikroorganizmaların (protozoa, virüs vb.) inaktivasyonunu artırırken (Mendez Hermida, 2007; Boyle ve diğ., 2008), diğer taraftan yeniden çoğalmayı da önlemektedir.

Güneş ışığı ile dezenfeksiyonun, sadece mikroorganizma türü tarafından değil, dezenfekte edilecek suyun özellikleri, suda bulunan organik ve inorganik bileşiklerin varlığı, sudaki

çözünmüş oksijenin varlığı, ışığın yoğunluğu, kalitesi, sıcaklık, reaktör tipi, havanın bulutluluğu, yerin konumu vb. pek çok faktör tarafından etkilendiği tespit edilmiştir (Helali ve diğ., 2014). Bu nedenle güneş ışığı ile dezenfeksiyon çalışmalarında, suyun özellikleri ve kullanılacak reaktör tipinin seçimi oldukça önemlidir.

Dünyada 2040 yılına kadar yenilenebilir enerji gelişim tahminleri değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgâr, güneş ısı ve güneş ısı enerji tüketimleri ön plana çıkmaktadır (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009). EİE tarafından hazırlanan Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası incelendiğinde, ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli bakımından şanslı olduğu görülmektedir (Pharabod ve Philibert, 1991; Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009). Ülkemiz güneş ışınım değerleri bakımından dört kuşağa ayrılrsa da farklı kuşaklarda yer alan farklı şehirler arasında fazla fark olmadığı ispatlanmıştır (Aksungur ve diğ., 2003). Bu güneş enerjisi potansiyelinin günümüzde, ülkemizin birinci güneş kuşağında bulunan Ege Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi kıyılarında sadece sıcak su elde etmek amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Ülkemiz güneş enerji potansiyelinin %20-25 oranında daha fazla olmasının beklendiği düşünüldüğünde (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009), bu enerji sadece su ısıtma amaçlı değil dezenfeksiyon amacı ile etkili bir şekilde kullanılabilir. Özellikle içme suyu veya sulama amacı ile kullanılacak suların dezenfeksiyonu sırasında, yan ürün oluşturmayan güneş ışığı radyasyonunu kullanmak etkili olacaktır. Bu aşamada suların bulanık olmasının oluşturacağı dezavantaj ise, son yıllarda kullanılmaya başlanan yarı iletken kaplı borosilikat vb. materyallerin güneş ışığı ile birlikte kullanılması ile ortada kaldırılabilir. Bununla birlikte doğal organik maddelerin parçalanması sonucu oluşan ara ürünler nedeni ile depolama tanklarında bakterilerin tekrar çoğalmasının da önüne geçilmiş olur.

Avrupa Çevre Ajansı tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmaya göre, yakın gelecekte Akdeniz'deki pek çok havzanın su stresiyle karşı karşıya kalması beklenmektedir. Bu kapsamda Türkiye de 2030 itibarıyla büyük ölçüde su stresiyle karşı karşıya kalacaktır. İç ve Batı bölgeleriyle Marmara, Karadeniz ve Akdeniz Bölgelerinin bir bölümünde %40'ı aşan, Güneydoğu ve Doğu Bölgelerinde ise %20-40 oranında su stresi yaşanacağı öngörülmektedir (Silkin 2014). Ülkemizin, 98 milyar m<sup>3</sup>/yıl yerüstü ve 12,0 milyar m<sup>3</sup>/yıl yeraltı suyu potansiyeli olmak üzere toplam kullanılabilir su potansiyeli 110,0 milyar m<sup>3</sup>/yıl'dır. Güneydoğu havzasında, içme ve kullanma suyunun büyük bir kısmı kuyular ve yüzeysel sular ile sağlanmaktadır (Çelik 2008; Yıldırım, 2004; WWC, 2003) Bu bölgelerde, sağlıklı ve güvenilir içme suyu elde etmek amacıyla güneş ışığına dayalı (Fe<sup>+3</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/güneş ışığı, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/güneş ışığı vb.) ucuz ve tehlikeli yan ürünler oluşturmayan proseslerin patojen inaktivasyonunda etkili olacağı düşünülmektedir. Buna ilaveten su stresinin yaşanacağı öngörülen ve en fazla güneş enerjisi alan Akdeniz ve Ege Bölgeleri' nde de (Varınca ve Gönüllü, 2006) bu yöntemlerin bir an önce uygulanmaya konması insan sağlığının korunmasının yanısıra, ekonomik açıdan da fayda sağlayacaktır. Bu nedenle, suların kimyasal kompozisyonu göz önünde bulundurularak güneş enerjisi ile dezenfeksiyon alanında yapılacak olan arazi uygulamalarına ağırlık verilmeli ve bu çalışmalar desteklenmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Agulló-Barcelo, M., Polo-Lopez, M.I., Lucena, F., Jofre, J., ve Fernandez-Ibanez, P. (2013) Solar advanced oxidation processes as disinfection tertiary treatments for real wastewater: Implications for water reclamation, *Applied Catalysis B: Environmental*, 136-137, 341-350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.01.069>
2. Acra, A., Raffoul, Z., Karahagopian, Y. (1984) Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions: guidelines for household application in developing countries, UNICEF, Paris, France.

3. Acra, A., Jurdi, M., Mu, H., Karahagopian, Y., Raffoul, Z. (1990) Water disinfection by solar radiation: assessment and application, *International Development Research Centre*, 53- 65.
4. Ahsan, A., Imteaz, M., Thomas, U.A., Azmi, M., Rahman, A., Nik Daud, N.N. (2014) Parameters affecting the performance of a low cost solar still, *Applied Energy*, 114, 924–930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.066>
5. Aksungur, K.M., Kurban, M. ve Filik, Ü.B. (2013) Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi, in 5th Conferance of Energy Efficiecnry and Quality. Kocaeli, Turkey.
6. Belapurkar, A.D., Sherkhane, P. ve Kale, S.P. (2006) Disinfection of drinking water using photocatalytic technique, *Current Science*, 91(1), 73-76.
7. Benabbou, A.K., Derriche, Z., Felix, C., Lejeune, P., Guillard, C. (2007) Photocatalytic inactivation of *Escherischia coli* Effect of concentration of TiO<sub>2</sub> and microorganism, nature, and intensity of UV irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental*, 76, 257–263. doi:10.1016/j.apcatb.2007.05.026
8. Berney, M., Weilenmann, H.U. ve Egli., T. (2006a) Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS), *Microbiology*, 152:1719-1729. doi: 10.1099/mic.0.28617-0
9. Berney, M., Weilenmann, H.U., Simonetti, A., Egli, T. (2006) Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella Typhimurium* and *Vibrio cholerae*, *Journal of Applied Microbiology*, 101(4), 828-836. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x
10. Bichai, F., Polo-López, M.I., Fernández Ibanez, P. (2012 ) Solar disinfection of wastewater to reduce contamination of lettuce crops by *Escherichia coli* in reclaimed water irrigation, *Water Research*, 46, 6040-6050. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.024>
11. Blanco, J., Malato, S., Fernández Ibanez, P., Alarcón, D., Gernjak, W., Maldonado, M.I. (2009) Review of feasible solar energy applications to water processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1437–1445. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.016
12. Bosshard, F., Bucheli, M., Meur, Y. ve Egli, T. (2010) The respiratory chain is the cell's Achilles' heel during UVA inactivation in *Escherichia coli*, *Microbiology*, 156, 2006–2015. Doi: 10.1099/mic.0.038471-0
13. Boyle, M., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., Arias-Quiroz, G.B. and Iriarte-Puná, Mercado, M.A., Ubomba-Jaswa, E. ve McGuigan, K.G. (2008) Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions, *Applied and Environmental Microbiology*, 74(10), 2997-3001. doi: 10.1128/AEM.02415-07
14. Britt, A.B. (1996) DNA damage and repair in plants, *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 47, 75–100. doi: 10.1146/annurev.arplant.47.1.75
15. Byrne, J.A., Fernandez-Ibanez, P.A., Dunlop, P.S.M., Alrousan, D.M.A. ve Hamilton, J.W.J. (2011) Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review, *International Journal of Photoenergy*, 1–12. doi:10.1155/2011/798051.
16. Cantwell, R.E., Hofmann, R. ve Templeton, M.R. (2008) Interactions between humic matter and bacteria when disinfecting water with UV light, *Journal of Applied Microbiology*, 105(1), 25-35. doi: 10.1111/j.1365-2672.2007.03714.x

17. Carratalà, A., Dionisio Calado, A., Mattle, M.J., Meierhofer, R., Luzi, S., Kohn., T. (2016) Solar disinfection of viruses in polyethylene terephthalate bottles. *Applied and Environmental Microbiology*, 82, 279–288. doi:10.1128/AEM.02897-15.
18. Caslake, L.F., Connolly, D.J., Menon, V., Duncanson, C.M., Rojas, R., Tavakoli, J. (2004) Disinfection of contaminated water by using solar irradiation, *Appl. Environmental Microbiology*, 70, 1145–1150. doi: 10.1128/AEM.70.2.1145-1150.2004
19. Chamberlain J. ve Moss, S.H. (1987) Lipid peroxidation and other membrane damage produced in *Escherichia coli* K1060 by near-UV radiation and deuterium oxide, *Photochemistry and Photobiology*, 45(5), 625-630. doi: 10.1111/j.1751-1097.1987.tb07389.x
20. Cho, M., Lee, Y., Chung, H. ve Yoon, J. (2004) Inactivation of *Escherichia coli* by photochemical reaction of ferrioxalate at slightly acidic and near-neutral pHs, *Applied and Environmental Microbiology*, 70(2), 1129-1134. doi: 10.1128/AEM.70.2.1129-1134.2004
21. Christen, A., Pacheco, G.D., Hattendorf, J., Arnold, B.F., Cevallos, M., Indergand, S., Colford, J.M. ve Mäusezahl, D. (2011) Factors associated with compliance among users of solar water disinfection in rural Bolivia, *BMC Public Health*, 11, 210-223. <http://www.biomedcentral.com/1471-2458/11/210>
22. Çalışkan Eleren, S., Alkan, U., ve Teksoy, A. (2014) Inactivation of *E. Coli* and *B. Subtilis* by solar and solar/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes in humic surface waters, *Fresenius Environmental Bulletin*, 23(6), 1397-1406.
23. Çelik, R., (2008) Diyarbakır ovasının yer altı ve yerüstü su potansiyeli, pompa verimlilik haritalarının çıkarılması, hidrojeolojik analizi, Doğu Anadolu Bölgesi araştırmaları, 154-164.
24. Davarcioglu, B. (2015) Solar water disinfection considerations: using ultraviolet light methods to make water safe to drink, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(8), 253-264.
25. Davies, C.M., Evison, L.M. (1991) Sunlight and the survival of enteric bacteria in natural waters, *Journal of Applied Microbiology*, 70(3), 265–274. doi: 10.1111/j.1365-2672.1991.tb02935.x
26. Dejung, S., Fuentes, I., Almanza, G., Jarro, R., Navarro, L., Arias, G., Urquieta, E., Torrico, A., Fenandez, W., Iriarte, M., Birrer, C., Stahel, W.A. and Wegelin, M. (2007) Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 56(4), 245-256. doi: 10.2166/aqua.2007.058
27. Deller, S., Mascher, F., Platzer, S., Reinthaler, F.F., Marth, E. (2006) Effect of solar radiation on survival of indicator bacteria in bathing waters, *Central European Journal of Public Health*, 14(3), 133–137.
28. Dunlop, P.S.M., Ciavola, M., Rizzo, L., Byrne, J.A. (2011) Inactivation and injury assessment of *Escherichia coli* during solar and photocatalytic disinfection in LDPE bags, *Chemosphere*, 85,1160–1166. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.09.006
29. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2009) Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi, ISBN: 978-605-89548-2-3. DEKTMK YAYIN NO: 0011/2009, EKC Form Ofset, Ankara.

30. Fernandez Ibanez, P. (2007) Solar disinfection of drinking water, Course on: Innovative Process and Practices for wastewater treatment and reuse, Ankara University, Turkey.
31. Feuerstein, O., Moreinos, D. ve Steinberg, D. (2006) Synergic antibacterial effect between visible light and hydrogen peroxide on *Streptococcus mutans*, *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 57,872–876. doi: 10.1093/jac/dkl070
32. Fisher, M.B., Iriarte, M., Nelson, K.L. (2012) Solar water disinfection (SODIS) of *Escherichia coli*, *Enterococcus spp.*, and *MS2 coliphage*: Effects of additives and alternative container materials, *Water Research*, 46, 1745-1754. doi:10.1016/j.watres.2011.12.048
33. Fridovich, I. (1998) Oxygen toxicity: A radical explanation, *Journal of Experimental Biology*, 201(8), 1203-1209.
34. Fogden, J. ve Wood, G. (2009) Access to safe drinking water and its impact on global economic growth a study, HaloSource, Inc., Bothell, WA 98021, USA.
35. Fujioka, R.S., Yoneyama, B.S. (2002) *Sunlight inactivation of human enteric viruses and fecal bacteria*, *Water Science and Technology*, 46(11-12), 291-295.
36. García-Fernández, I., Polo-López, M.I., Oller, I. ve Fernández-Ibáñez, P. (2012) Bacteria and fungi inactivation using  $\text{Fe}^{3+}$ /sunlight,  $\text{H}_2\text{O}_2$ /sunlight and near neutral photo-Fenton: A comparative study, *Applied Catalysis B: Environmental*, 121–122, 20–29.
37. Gelover, S., Gómez, L.A., Reyes, K. ve Leal, M.T. (2006) A practical demonstration of water disinfection using  $\text{TiO}_2$  films and sunlight, *Water Research*, 40(17), 3274-3280. doi:10.1016/j.watres.2006.07.006
38. Gomes, A.I., Santos, J.C., Vilar, V. J.P. and Boaventura, R.A.R. (2009) Inactivation of bacteria *E. coli* and photodegradation of humic acids using natural sunlight, *Applied Catalysis B: Environmental*, 88(3-4), 283-291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.11.014>
39. Gomes, A.I., Vilar, V.J.P., Boaventura, R.A.R. (2009b) Synthetic and natural waters disinfection using natural solar radiation in a pilot plant with CPCs, *Catalysis Today*, 144(1–2), 55–61.
40. Gómez-Couso, H., Fontán-Sainz, M., McGuigan, K.G., Ares-Mazás, E. (2009a) Effect of the radiation intensity, water turbidity and exposure time on the survival of *Cryptosporidium* during simulated solar disinfection of drinking water, *Acta Tropica*, 112(1), 43–48. doi:10.1016/j.actatropica.2009.06.004
41. Gómez-Couso, H., Fontán-Sainz, M.C., Fernández-Ibanez, P. ve Ares-Mazás, E. (2009b) Efficacy of the solar water disinfection method in turbid waters experimentally contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under real field conditions, *Tropical Medicine & International Health*, 14(6), 620–627. doi: 10.1111/j.1365-3156.2009.02281.x
42. Halliwell, B. Ve Gutteridge, J. (1999) Free radicals in biology and medicine, Oxford University Press, Oxford, U.K.
43. Hara, K., Holland, S., ve Woo J. (2004) Effects of Exogenous Reactive Oxygen Species Scavengers on the Survival of *Escherichia coli* B23 during Exposure to UV-A radiation, *Journal of Experimental Microbiology and Immunology*, 12,62-66.
44. Helali, S., Polo-López, M.I., Fernández-Ibáñez, P., Ohtani, B., Amano, F., Malato, S., Guillar, C. (2014) Solar photocatalysis: A green technology for *E. coli* contaminated water disinfection. Effect of concentration and different types of suspended catalyst, *Journal of*

*Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 276, 31–40.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.11.011>

45. Hernández-Ramírez, A., Medina-Ramirez, I. (Eds.) (2015) Photocatalytic Semiconductors: Synthesis, Characterization, and Environmental Applications, Springer International Publishing Switzerland. Page: 289, DOI: 10.1007/978-3-319-10999-2.
46. Hoerter, J.D., Arnold, A.A., Kuczynska, D.A., Shibuya, A., Ward, C.S., Sauer, M.G., Gizachew, A., Hotchkiss, T.M., Fleming, T.J., Johnson, S. (2005) Effects of sublethal UVA irradiation on activity levels of oxidative defense enzymes and protein oxidation in *Escherichia coli*, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 81(3),171-180.
47. Huang, Z., Maness P.C., Blake, D.M., Wolfrum, E.J., Smolinski, S.L., Jacoby, W.A. (2000) Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 130, 163–170. doi:S1010-6030(99)00205-1
48. Hug, S. ve Leupin, O. (2003) Iron-catalyzed oxidation of arsenic(III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction, *Environmental Science and Technology*, 37(12), 2734-2742. doi: 10.1021/es026208x
49. Imlay, J.A. (2008) Cellular defenses against superoxide and hydrogen peroxide, *Annual Review of Biochemistry*, 77, 755–776. doi: 10.1146/annurev.biochem.77.061606.161055.
50. Jang, S., Imlay, J.A. (2010) Hydrogen peroxide inactivates the *Escherichia coli* Isc iron-sulphur assembly system, and OxyR induces the Suf system to compensate, *Molecular Microbiology*, 78(6), 1448–1467. doi:10.1111/j.1365-2958.2010.07418.x
51. Joyce, T.M., McGuigan, K.G., Elmore-Meegan, M., Conroy, R.M. (1996) Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating, *Applied and Environmental Microbiology*, 62 399–402.
52. Kalt, P., Birzer, C., Evans, H., Liew, A., Padovan, M., ve Watchman, M. (2014) A Solar Disinfection Water Treatment System for Remote Communities, *Procedia Engineering*, 78, 205-258. doi: 10.1016/j.proeng.2014.07.064
53. Kehoe, S.C., Joyce, T.M., Ibrahim, P., Gillespie, J.B., Shahar, R.A., ve McGuigan, K.G. (2001) Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors, *Water Research*, 35(4), 1061-1065. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00353-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00353-5)
54. Khaengraeng, R., ve Reed, R. H. (2005) Oxygen and photoinactivation of *Escherichia coli* in UVA and sunlight, *Journal of Applied Microbiology*, 99(1), 39-50. doi: 10.1111/j.1365-2672.2005.02606.x
55. Kılıç, F.Ç. (2015) Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
56. Kiwi, J. ve Nadtochenko, V. (2005) Evidence for the Mechanism of Photocatalytic Degradation of the Bacterial Wall Membrane at the TiO<sub>2</sub> Interface by ATR-FTIR and Laser Kinetic Spectroscopy, *Langmuir*, 21, 4631-4641. doi: 10.1021/la046983l
57. Lee, E., Lee, H., Jung, W., Park, S., Yang, D., ve Lee K. (2009) Influences of humic acids and photoreactivation on the disinfection of *Escherichia coli* by a high-power pulsed UV irradiation, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 26(5), 1301-1307. doi: 10.1007/s11814-009-0208-5

58. Lonnen, J., Kilvington, S., Kehoe, S.C., Al-Touati, F. ve McGuigan, K.G. (2005) Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water, *Water Research*, 39(5), 877–883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.023>
59. Mahvi, A.H. (2007) Feasibility of Solar Energy in Disinfection of Drinking Water in Iran, *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 2(4), 407-410.
60. Mamane, H., Shemer, H., Linden, K.G. (2007) Inactivation of *E. coli*, *B. subtilis* spores, and MS2, T4, and T7 phage using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation, *Journal of Hazardous Materials*, 146, 479–486. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.04.050
61. Mani, S.K., Kanjur, R., Bright Singh, I.S., Reed, R.H. (2006) Comparative effectiveness of solar disinfection using small-scale batch reactors with reflective, absorptive and transmissive rear surfaces, *Water Research*, 40, 721–727. doi:10.1016/j.watres.2005.11.039
62. Manjón, F., Villén, L., García-Fresnadillo, D., ve Orellana, G. (2008) On the factors influencing the performance of solar reactors for water disinfection with photosensitized singlet oxygen, *Environmental Science & Technology*, 42(1), 301–307. doi: 10.1021/es071762y
63. Maraccini, P.A., M. Mattioli C.M., Sassoubre, L.M., Cao, Y., Griffith, J.F., Ervin, J.S., Werfhorst, L.C.V. D., ve Boehm, A.B. (2016) Solar inactivation of *Enterococci* and *Escherichia coli* in natural waters: effects of water absorbance and depth, *Environmental Science & Technology*, 50, 5068–5076. doi: 10.1021/acs.est.6b00505
64. McGuigan, K.M., Joyce, T.M., Conroy, R.M., Gillespie, J.B. ve Elmore-Meegan, M. (1998) Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process, *Journal of Applied Microbiology*, 84(6), 1138-1148. doi: 10.1046/j.1365-2672.1998.00455.x
65. McGuigan, K.G., Conroy, R.M., Mosler, H.J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., Fernandez-Ibanez, P. (2012) Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top, *Journal of Hazardous Materials*, 235–236, 29–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>
66. Méndez-Hermida, F., Castro-Hermida, J.A., Ares-Mazás, E., Kehoe, S.C., McGuigan, K.G. (2005) Effect of batch-process solar disinfection on survival of *Cryptosporidium parvum* oocysts in drinking water, *Applied and Environmental Microbiology*, 71(3), 1653-1654. doi: 10.1128/AEM.71.3.1653-1654.2005
67. Méndez-Hermida, F., Ares-Mazás, E., McGuigan, K.G., Boyle, M., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P. (2007) Disinfection of drinking water contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under natural sunlight and using the photocatalyst TiO<sub>2</sub>, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 88(2–3), 105–111. doi:10.1016/j.jphotobiol.2007.05.004
68. Meierhofer R., ve Wegelin M. (2002) Solar Water Disinfection: A Guide for the application of SODIS, SANDEC-EAWAG, Report No: 06/02, Switzerland.
69. Méndez-Hermida, F., Castro-Hermida, J.A., Ares-Mazás, E., Kehoe, S.C. ve McGuigan, K. G. (2005) Effect of Batch-Process Solar Disinfection on Survival of *Cryptosporidium parvum* Oocysts in Drinking Water, *Applied and Environmental Microbiology*, 71(3), 1653–1654. doi:10.1128/AEM.71.3.1653–1654.2005
70. Mohamed, A.H., Galal, M., Osman, G.Y. ve Aboamer, M. (2014) Influence of solar energy on encysted parasitic protozoa *Giardia* and *Entamoeba spp* in water-treatment plants,

Egypt, *Journal of Materials Science and Engineering B*,4(10), 284-292. doi: 10.17265/2161-6221/2014.10.003

71. Moncayo-Lasso, A., Sanabria, J., Pulgarin, C., Benítez, N. (2009) *Simultaneous E. coli* inactivation and NOM degradation in river water via photo-Fenton process at natural pH in solar CPC reactor. A new way for enhancing solar disinfection of natural water, *Chemosphere*, 77, 296–300. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.07.007
72. Mtapuri-Zinyowera, S., Midzi, N., Muchaneta-Kubara, C.E., Simbini, T. ve Mdluluzi T. (2009) Impact of solar radiation in disinfecting drinking water contaminated with *Giardia duodenalis* and *Entamoeba histolytica/dispar* at a point-of-use water treatment, *Journal of Applied Microbiology*, 106(3), 847–852. doi: 10.1111/j.1365-2672.2008.04054.x
73. Muela, A., Garcia-Bringas, J.M., Arana, I., Barcina, I. (2000) Humic Materials Offer Photoprotective Effect to *Escherichia coli* Exposed to Damaging Luminous Radiation, *Microbial Ecology*, 40, 336-344. doi: 10.1007/s002480000064
74. Nalwanga, R., Quilty, B., Muyanja, C., Fernandez-Ibanez, P., McGuigan, K.G. (2014) Evaluation of solar disinfection of *E. coli* under Sub-Saharan field conditions using a 25L borosilicate glass batch reactor fitted with a compound parabolic collector, *Solar Energy*, 100, 195–202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.011>
75. Nararom, M., Thepa, S., Kongkiattikajorn, J., Songprakorp, R. (2015) Disinfection of water containing *Escherichia coli* by use of a compound parabolic concentrator: effect of global solar radiation and reactor surface treatment, *Research on Chemical Intermediates*, 41(9), 6543–6558. doi: 10.1007/s11164-014-1760-0
76. Navntoft, C., Ubomba-Jaswa, E., McGuigan, K.G., Fernández-Ibáñez, P. (2008) Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminium reflectors under real conditions: Natural well-water and solar light, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 93, 155–161. doi:10.1016/j.jphotobiol.2008.08.002
77. Ndounlaa, J., Spuhler, D., Kenfack, S., Wéthé, J., Pulgarin C. (2013) Inactivation by solar photo-Fenton in pet bottles of wild enteric bacteria of natural well water: Absence of re-growth after one week of subsequent storage, *Applied Catalysis B: Environmental*, 129, 309–317. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.09.016>
78. Ndounlaa, J., Kenfack, S., Wéthé, J., Pulgarin C. J. (2014) Relevant impact of irradiance (vs. dose) and evolution of pH and mineral nitrogen compounds during natural water disinfection by photo-Fenton in a solar CPC reactor, *Applied Catalysis B: Environmental*, 148–149, 144–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.048>
79. Oates, P.M., Shanahan, P., Polz, M.F. (2003) Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti, *Water Research*, 37, 47–54. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00241-5.
80. Pharabod, F. ve Philibert, C. (1991) LUZ solar power plants : Success in California and worldwide prospects, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. for IEA-SSPS (SolarPACES), Köln.
81. Polo-López, M.I., Fernández-Ibáñez, P., García-Fernández, I., Oller, I., Salgado-Tránsito, I., ve Sichel, C., (2010) Resistance of *Fusarium sp* spores to solar TiO<sub>2</sub> photocatalysis: influence of spore type and water (scaling-up results), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(8), 1038–1048. doi: 10.1002/jctb.2397



82. Polo-López, M.I., García-Fernández, I., Oller, I. ve Fernández-Ibáñez, P. (2011) Solar disinfection of fungal spores in water aided by low concentrations of hydrogen peroxide, *Photochemical & Photobiological Sciences*, 10, 381-388. doi: 10.1039/C0PP00174K
83. Pulgarin, C., Kiwia, J., Nadtochenko, V. (2012) Mechanism of photocatalytic bacterial inactivation on TiO<sub>2</sub> films involving cell-wall damage ve lysis, *Applied Catalysis B: Environmental*, 128(30), 179–183. doi:10.1016/j.apcatb.2012.01.036
84. Reed, R.H., Mani, S.K. ve Meyer, V. (2000) Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations, *Letters in Applied Microbiology*, 30, 432-436. doi: 10.1046/j.1472-765x.2000.00741.x
85. Riesenman, P.J., Nicholson, W.L. (2000) Role of the spore coat layers in *Bacillus subtilis* spore resistance to hydrogen peroxide, artificial UV-C, UV-B, and solar UV radiation, *Applied and Environmental Microbiology*, 66(2), 620-626. doi: 10.1128/AEM.66.2.620-626.2000
86. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2003) Photocatalytical inactivation of *E. coli*: effect of (continuous–intermittent) light intensity and of (suspended–fixed) TiO<sub>2</sub> concentration, *Applied Catalysis B: Environmental*, 44, 263–284. doi:10.1016/S0926-3373(03)00076-6
87. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2004a) Bactericidal action of illuminated TiO<sub>2</sub> on pure *Escherichia coli* and natural bacterial consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time, *Applied Catalysis B: Environmental*, 49(2), 99-112. doi:10.1016/j.apcatb.2003.11.013
88. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2004b) Field solar *E. coli* inactivation in the absence and presence of TiO<sub>2</sub>: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection?, *Solar Energy*, 77, 635–648. doi:10.1016/j.solener.2004.08.002
89. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2004c) Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO<sub>2</sub> implications in solar water disinfection, *Applied Catalysis B: Environmental*, 51(4), 283-302. doi:10.1016/j.apcatb.2004.03.007
90. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2006) Comparative evaluation of Fe<sup>3+</sup> and TiO<sub>2</sub> photoassisted processes in solar photocatalytic disinfection of water, *Applied Catalysis B: Environmental*, 63(3-4), 222-231. doi:10.1016/j.apcatb.2005.10.009
91. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2007a) Fe<sup>3+</sup> and TiO<sub>2</sub> solar-light-assisted inactivation of *E. coli* at field scale: Implications in solar disinfection at low temperature of large quantities of water, *Catalysis Today*, 122(1–2), 128–136. doi:10.1016/j.cattod.2007.01.028
92. Rincón, A.G. ve Pulgarin, C. (2007b) Absence of *E. coli* regrowth after Fe<sup>3+</sup> and TiO<sub>2</sub> solar photoassisted disinfection of water in CPC solar photoreactor, *Catalysis Today*, 124, 204–214. doi:10.1016/j.cattod.2007.03.039
93. Sciacca, F., Rengifo-Herrera, J.A., Wéthé, J., Pulgarin, C. (2010) Dramatic enhancement of solar disinfection (SODIS) of wild *Salmonella* sp. in PET bottles by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> addition on natural water of Burkina Faso containing dissolved iron, *Chemosphere*, 78(9), 1186–1191. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.12.001.
94. Sharpe, M., Robb, S. ve Clark, J. (2003) Nitric oxide and Fenton/Haber–Weiss chemistry: Nitric oxide is a potent antioxidant at physiological concentrations, *Journal of Neurochemistry*, 87, 386-394. doi: 10.1046/j.1471-4159.2003.02001.x
95. Sichel, C., Blanco, J., Malato, S. and Fernández-Ibáñez, P. (2007) Effects of experimental conditions on *E. coli* survival during solar photocatalytic water disinfection, *Journal of*

- Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 189(2-3), 239-246.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.02.004>
96. Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., de Carac, M., Telloc, J. (2009) Lethal synergy of solar UV-radiation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on wild *Fusarium solani* spores in distilled and natural well water, *Water Research*, 43, 1841–1850. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.017>
97. Silkin, H. (2014). İklim değişikliğine uyum özelinde bazı uygulamaların Türkiye açısından değerlendirilmesi, Orman ve Su İşleri Uzmanlık Tezi, T.C.Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
98. Sinton, L.W., Hall, C.H., Lynch, P.A., Davies-Colley, R.J. (2002) Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline waters, *Applied and Environmental Microbiology*, 68(3), 1122–1131. doi: 10.1128/AEM.68.3.1122-1131.2002
99. Sommer, B., Marino, A., Solarte, Y., Salas, M.L., Dierolf, C., Valiente, C., Mora, D., Rechsteiner, R., Setter, P., Wirojanagud, W., Ajarmeh, H.A., AlHassan, Wegelin, M. (1997) SODIS – an emerging water treatment process, *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 46, 127–137.
100. Spuhler, D., Rengifo-Herrera, J.A. ve Pulgarin, C. (2010) The effect of Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and the photo-Fenton reagent at near neutral pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing *Escherichia coli* K12. *Applied Catalysis B: Environmental*, 96(1-2), 126-141. doi:10.1016/j.apcatb.2010.02.010
101. Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. (2004) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4. Edition, Mc Graw- Hill, Singapore.
102. Tsydenova, O., Batoev, V., ve Batoeva, A. (2015) Solar-Enhanced Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Simultaneous Removal of Pathogens and Chemical Pollutants, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 9542-9561. doi:10.3390/ijerph120809542
103. Ubomba-Jaswa, E., Navntoft, C., Polo-Lopez, M.I., Fernandez-Ibanez, P., McGuigan, K.G. (2009) Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency, *Photochemical and Photobiological Sciences*, 8, 587–595. DOI: 10.1039/B816593A.
104. Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Pesaro, F. ve Metzler, A. (1994) Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments, *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 43(3), 154-169.
105. Wegelin M., Del, X., Torres, R., Gremion, B., Mercado, A., Mausezahl, D., Hobbins, M., Indergand-Echeverria, S., Grimm, B. ve Aristanti, C. (2002). EAWAG and SANDEC. Solar Water Disinfection, A Guide for The Application of SODIS
106. Wilson, S.A. (2010). Impact of water quality on solar disinfection (SODIS): Investigating a natural coagulant pretreatment on the photoinactivation of *Escherichia Coli*, McS Thesis, University of Toronto.
107. World Water Council; Ministry of Foreign Affairs, Department of Regional and Transboundary Waters, General Directorate of State Hydraulic Works; Southeastern Anatolia Project Regional Development ,Administration,(2003) Republic of Turkey.

108. Varınca, K.B. ve Gönüllü, M. T. (2007) Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, *Kaynak Elektrik Dergisi*, 217, 127-130.
109. Vicars, S. (1999). Factors affecting the survival of enteric bacteria in saline waters. PhD Thesis. Northumbria University, Newcastle upon Tyne.
110. Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., Block, S.S (2005) Enhanced photocatalytic inactivation of bacterial spores on surfaces in air, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 32, 364–370. doi: 10.1007/s10295-005-0006-y
111. Yıldırım, S., Algan, M., Alkaranlı, T.F. (2004) Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Havza Islahı Ve Göletler Daire Başkanlığı Yeraltı Sulamaları I.Yeraltı Sulamaları Ulusal, Sempozyumu Konya.
112. Yoriya, S., Chumphu, A., Pookmanee, P., Laithong, W., Thepa, S., ve Songprakorp, R. (2016) Multi-Layered TiO<sub>2</sub> films towards enhancement of *Escherichia coli* inactivation, *Materials*, 9(10), 808-820. doi:10.3390/ma9100808
113. Zhang, P., Scudato, R.J., Germano, G. (1994) Solar catalytic inactivation of *Escherichia coli* in aqueous solutions using TiO<sub>2</sub> as catalyst, *Chemosphere*, 28(3), 607-611. doi:10.1016/0045-6535(94)90302-6

