

Bakteri Gideriminde Sonofotokatalitik Yöntemin Kullanımı

Tuba YETİM¹

ÖZET: Bu çalışmada, atık suların mikroorganizmalardan arıtımı için alternatif olan ve son zamanlarda dikkat çeken yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla özellikle atık sularda yer alan *Salmonella typhi* RSHMB 96051 bakterisinin giderimi sonoliz, fotokataliz ve sonofotokataliz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan denemelerde farklı ışık şiddetlerinin bakteri giderimindeki etkileri bu prosesler üzerinde çalışılmıştır. Denemelerde ultrases enerjisi ve ultraviyole ışınlar hem ayrı ayrı hem de eşzamanlı olarak birlikte kullanımlarıyla yapılmıştır. Bu prosesler sırasıyla sonoliz, fotokataliz ve sonofotokataliz prosesleridir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında her üç tekniğin de bakteri gideriminde oldukça etkili olduğu ancak fotokataliz ve sonolizin birlikte kullanılmasıyla olan etkinin en fazla olduğu tespit edilmiş ve bu yöntemle %100 giderime yaklaşık 6 dakika gibi kısa bir sürede ulaşıldığı tayin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık su, fotokataliz, *Salmonella typhi*, sonofotokataliz, sonoliz

The Usage of Sonophotocatalytic Process for the Disinfection of Bacteria

ABSTRACT: In this study, some of the alternative methods have been utilized for the disinfection of microorganisms in the waste water. The disinfection of *Salmonella typhi* RSHMB 96051 bacteria in the waste water was investigated using the sonolysis, photocatalysis and sonophotocatalysis processes. In experiments, the effects of different light intensities have been investigated with the processes mentioned above. The ultrasound energy and ultraviolet light were used separately and together as well. These processes are called sonolysis, photocatalysis and sonophotocatalysis respectively. The results yielded that all the processes were quite effective. The simultaneous use of sonolysis and photocatalysis yielded the best results. 100% disinfection ratio was obtained within 6 minutes in this study.

Keywords: Waste water, photocatalysis, *Salmonella typhi*, sonophotocatalysis, sonolysis

¹ Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Erzurum, Türkiye
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Tuba YETİM,tuba.yetim@erzurum.edu.tr

GİRİŞ

Atık sulara bulunan bakteri, parazit ve virüs gibi birçok organizma çeşitli sağlık problemlerine yol açabilmektedir. Özellikle koliform bakterilerden olan *Salmonella* ve *Shigella*'nın suda bulunmaları mikrobiyal kontaminasyon belirteçleri olmaları sebebiyle, insan sağlığı ve suyun kalitesi açısından çok önemlidir. Bu bakterilerin içme sularında bulunmaları hastalık belirteçleridir. (Bella and Tam, 2000; Brooks et al., 2013) *Salmonella* bakterileri, Enterobacteriaceae familyasına ait fakültatif anaerobik olup, ciddi hastalıklara sebep olan en önemli patojenlerdendir. Gram-negatif, çubuk şekilli ve genellikle hareketli kamçı yapıya sahiptir. *Salmonella enterica* serovar *typhi*, *Salmonella*'nın sebep olduğu enfeksiyonlar arasında en yaygın serovardan biridir. Baskın bir şekilde bağırsak lümeninde bulunur ve enfekte olmuş insan veya hayvan dışkısı ile dışarı atılır. Böylece, su kaynaklarına karışabilir ve oradan da toprağa, sebze ve meyve gibi yiyeceklere bulaşabilir. Bu durumda kolaylıkla enfeksiyon veya reenfeksiyona sebep olabilir (Lopez-Velasco et al., 2015; Fuhrmann et al., 2016; Krzyzanowski Jr et al., 2016).

Bu atık sular, akarsulara, denizlere ve doğal sulara karıştığında, bu bileşenler su kaynaklarına geçer. Bu bileşenler toksik, kanserojenik ve mutajenik olduklarından dolayı, insan, çevre ve canlı organizmalar için tehlikeli ve zararlıdır (Farmer and Brenner, 2003; Lopez-Velasco et al., 2015; Lonigro et al., 2016). Atıksuların ıslahı, temiz su kaynaklarının kısıtlı olmasından dolayı, yüksek sağlık standartları ve temiz su kaynaklarına artan ilgi sebebiyle oldukça önemlidir. Atıksuların iyileştirilmesi için çeşitli dezenfeksiyon yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Atıksu arıtımı, çeşitli kullanımlar sonucu oluşan atıksuların deşarj edildikleri alıcı ortamın fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirmek için uygulanan fiziksel kimyasal ve biyolojik proseslerin birini ya da birkaçını kapsamaktadır (Sallach et al., 2015; mmo.org., 2016; Krzyzanowski Jr et al., 2016).

Suyun dezenfeksiyonunda istenmeyen kimyasal ve biyolojik kontaminantları uzaklaştırmak için bazı fiziksel, biyolojik ve kimyasal prosesler kullanılmaktadır. Ama maalesef bu prosesler fazla tahrip edici olmayabilirken, uygulanmaları zor ve oluşan zararlı yan ürünlerden

dolayı çevreyi ve insan sağlığını tehlikeye sokan ağır kimyasal iyileştirmelerin kullanımını gerekli kılmaktadır (Masarikova et al., 2016; Giannakis et al., 2016). Son zamanlarda atıksuların dezenfeksiyonunda bakterilerin bertarafı konusunda fotokatalitik yöntemler önemli ölçüde dikkat çekmektedir (Rook, 1974; Huang 2000; Nissinen, 2002). Fotokataliz yöntemi atıksularda bulunan büyük miktarlardaki kimyasal bileşik ve bakteri bertarafında oldukça etkili bir yöntemdir (Huang et al., 2000; Barrett, 2016; Tanga et al. 2016). Bilindiği üzere TiO_2 , ZnO , ZrO_2 ve WO_3 yaygın olarak kullanılan fotokatalizörlerdir. Bunun yanında TiO_2 , ucuzluğu, fotoaktifliği, toksik olmaması ve kararlı olmasından dolayı en yaygın olarak kullanılan fotokatalizördür (Pigeot-Rémya et al., 2011; Wang et al., 2015; Zyouda et al., 2016; mmo.org., 2016). Bunun yanında suların dezenfeksiyonu için farklı bir teknoloji olan sonoliz yöntemi de kullanılmaktadır. Sonoliz yöntemi, kavitasyon sayesinde oksidatif bir çevre oluşturan ultrases dalgaları ile çalışır. Kavitasyon sulu çözeltide lokal mikro kabarcıkların ve süperkritik bölgelerin oluşumuna sebep olur. Bu kabarcıkların çöküşü çok yüksek lokal sıcaklık ve basınçlar oluşturur. Bu durum çok kısa sürelidir, ancak son derece reaktif radikalleri meydana getirir. Bu radikaller suda bulunan bakterilerin oksidatif tahribatını gerçekleştirirler (Konstantinou et al., 2004; Behnajady et al., 2006; Daneshvar et al., 2004; Monteagudo et al., 2014). Sonolizin tek başına kullanımı kuvvetli bir dezenfeksiyona sebep olur. Bununla birlikte, sonoliz tek başına kullanıldığında %100 bakteri bertarafını elde etmek için çok yüksek ultrasonik şiddetin kullanılması gerekmektedir. Ancak, bu kullanım şekli geniş çaptaki mikrobiyal arıtım için oldukça pahalı bir teknik olduğundan ultrasesin arıtmadaki kullanımında diğer tekniklere ilave teknik olarak kullanım yoluna doğru gidilmektedir. Çünkü bazı mikroorganizmalar biyositler, ultraviyole ışık ve ısı iyileştirmeler gibi bazı dezenfeksiyon yöntemlerine karşı dirençli olmaktadır. Bu manzarada, son zamanlardaki çalışmalar düşük frekanstaki ultrases enerjisinin (20-40 kHz aralığında) yanında ultraviyole ışınları, heterojen kataliz (aktif karbon, seramik, çinko ve titanium dioksit) gibi yöntemler ile birlikte ele alınmaktadır. Literatürde dezenfeksiyonun etkisinin birleştirilmiş yöntemlerle arttırılabileceği belirtilmektedir (Wu, 2008; Monteagudo et al., 2014; Ertugay and Acar, 2014).

Bu çalışmada, atık sularda bulunan *Salmonella typhi* RSHMB 96051 bakterisinin giderimi için fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik yöntemler kullanılmıştır. Bunun için de farklı ışık şiddetleri çalışma parametreleri olarak seçilmiştir. Bütün denemeler aynı şartlar altında ultraviyole ışınları ile ultrases enerjisinin tek başlarına kullanımları ve ayrıca iki yöntemin eşzamanlı olarak birlikte kullanımları ile tekrar edilmiştir. Bu yöntemler arasında karşılaştırma yapılarak atıksuların dezenfeksiyonunda en etkili yöntem belirlenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Denemeler Pyrex cam reaktörde gerçekleştirildi. Ultrases enerjisi, bir Ultrasonic Homogenizer (Type Cole Parmer, Ultrasonic Homogenizer, 750 W, 20 kHz) kullanılarak sağlanmıştır. Denemeler, dış yüzeyi ışığa karşı iyice yalıtılmış, üstten ultrases prob girişli ceketli bir reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı, programlanabilir sabit sıcaklık su sirkülatörü ile sabit tutulmuştur. Değişik ışık şiddetlerindeki Pen-Ray UV lambalar (Cole, Parmer, 365 nm, 44 W m⁻², 88 W m⁻²) ışın kaynağı olarak reaktörün üst kısmından tatbik edilmiştir. Reaksiyon ortamı için gerekli O₂, bir vakum pompası vasıtasıyla hava gönderilerek sağlanmıştır. Denemelerde fotokatalizör olarak Degussa P-25 TiO₂ kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği özelliklere göre, P-25; %80 anatase ve %20 rutile kristal yapısına sahiptir. BET yüzey alanı, 50 m² g⁻¹ ve 30 nm tane boyutundadır.

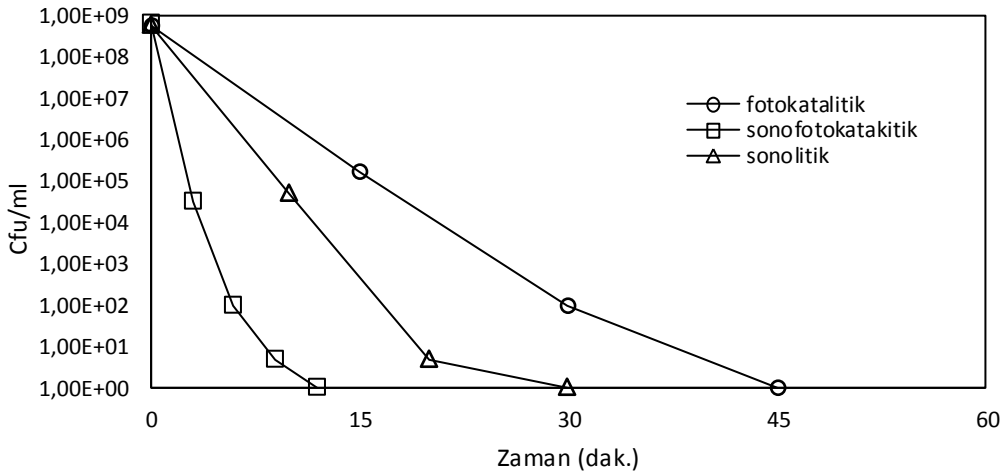
Çalışmada bakteri olarak *Salmonella typhi* RSHMB 96051 suşu kullanılmıştır. Suş 250 ml'lik tüplerde aerobik ortamda 100 ml'lik besiyerinde 37 °C' de döner çalkalayıcıda bir gece büyütüldü. Kullanılmak üzere bakteri süspansiyonunda son bakteri konsantrasyonu 10⁸ cfu ml⁻¹ olarak ayarlandı. Bakterinin hücre canlılığı Plate Count Agar (PCA)'da test edildi. Reaksiyonlar sırasında örnekler 60 dakikada bir düzenli periyotlarla üçlü kopyası halinde süspansiyon ortamından çekildi. Örneğin fosfat tampon çözeltilerinde seri dilüsyonlarından sonra, canlılık sayımı PCA petriyelerinde gerçekleştirildi. Bütün petriyeler 37 °C de 24–48–72 saat inkübe edildi.

Denemelerde kullanılan parametrelerin sabit tutulacağı değerler, ultrases enerjisinin amplitüdü %60 (55.03W), ışık şiddeti 44 W m⁻² ve sıcaklık 37 °C olarak belirlenmiştir. Reaktör dış ortam ışığından izole edilmiştir. Denemeler manyetik karıştırıcı ile sürekli karıştırılmıştır. Fotokatalitik denemelerde bakteri çözeltisi ile birlikte, fotokatalizör olarak kullanılan TiO₂'den ön denemeler sonucu belirlenen 300 mg optimum değeri reaktöre yüklenmiştir. Belirli zaman aralıklarında 5'er ml.'lik örnekler reaktörden çekilmiştir. Örneklere dokuz kere dilüsyon yapılmıştır. Her bir dilüsyonun yayılımı PCA' lara yapılmıştır. Ayrıca en etkili prosesin belirlenmesini desteklemek amacıyla alınan SEM görüntüleri FEI QUANTA-250 model cihazın E-SEM modunda çalıştırılması ile elde edilmiştir. Sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik prosesler bu çalışmalarda denenerek dezenfeksiyonda hangisinin en etkili proses olduğu araştırılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik proseslerin bakteri giderimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla ışık şiddeti değişken parametre olarak; başlangıç bakteri konsantrasyonu 10⁸ cfu ml⁻¹, sonoliz amplitüdü % 60, UV lamba dalga boyu 365 nm, katalizör miktarı 300 mg ve sıcaklık 37°C sabit parametreler olarak belirlenmiştir. Denemelerde değişken parametre olarak kullanılan ışık şiddetleri ise 44 ve 88 W m⁻² değerlerinde çalışılmıştır.

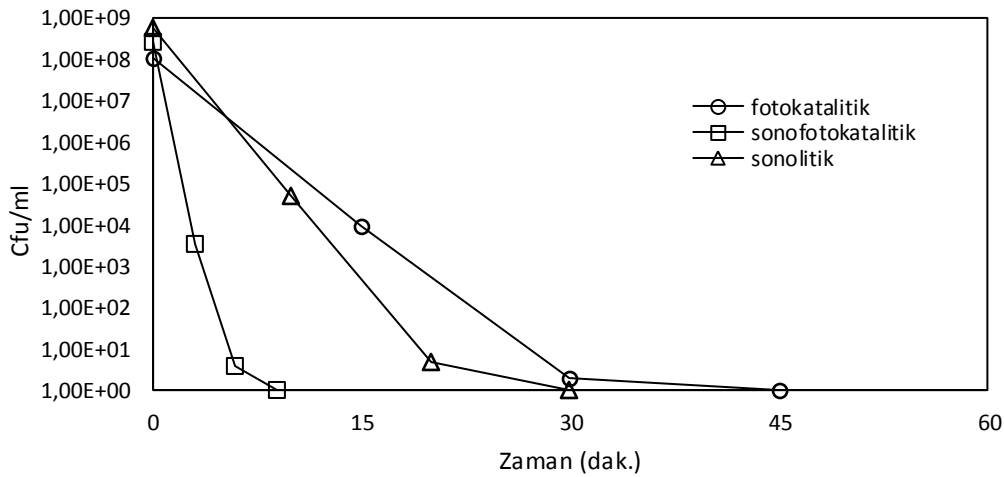
365 nm ve 44 W m⁻² ışık şiddetinde çalışılan sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik proseslere ait zamana karşı bakteri giderim değerleri Şekil 1.' de gösterilmiştir. Buna göre 15. dakikada ortamda kalan bakteri konsantrasyonu değerleri sırasıyla fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik prosesler için yaklaşık olarak, 1.7x10⁵, 2.3x10³ ve 0 cfu ml⁻¹ 'dir. Bakterilerin tamamen giderimi fotokatalitik proseste 45. dakikadan sonra, sonolitik proseste 30. dakikadan sonra ve sonofotokatalitik proseste ise 12. dakikadan sonra gözlenmiştir.



Şekil 1. 365 nm dalga boyunda, 44 W/m² ışık şiddetinde, %60 amplitüde, 37 °C' de, 300 mg TiO₂ kullanımında fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik proseslerle zamana karşı bakteri giderimi grafiği

365 nm ve 88 W/m² ışık şiddetinde çalışılan sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik proseslere ait zamana karşı bakteri giderim değerleri Şekil 2.' de gösterilmiştir. Buna göre 15. dakikada ortamda kalan bakteri konsantrasyonu değerleri sırasıyla fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik prosesler için yaklaşık olarak, 9x10³, 3.1x10² ve 0 cfu ml⁻¹ 'dir. Bakterilerin

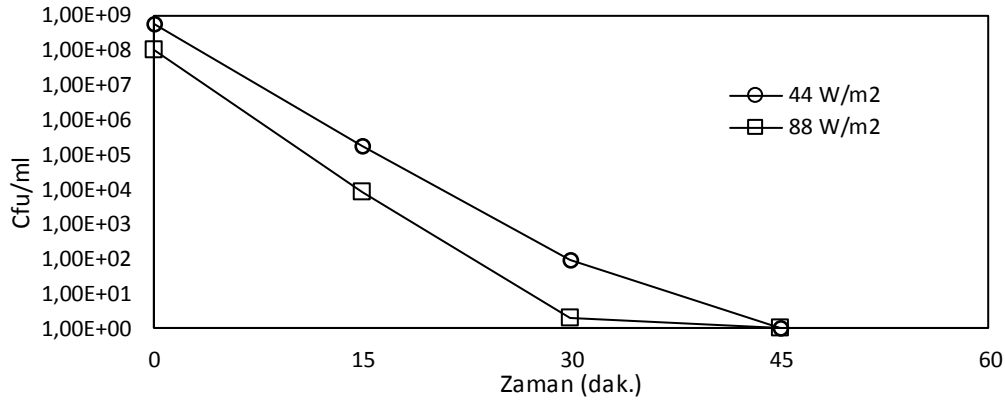
tamamen giderimi fotokatalitik proseste 45. dakikadan sonra, sonolitik proseste 30. dakikadan sonra ve sonofotokatalitik proseste ise 9. dakikadan sonra gözlenmiştir. Her iki grafikten de görülmektedir ki, bakteri gideriminde bu üç proses arasında en hızlı ve en etkili olanı sonofotokatalitik prosedir.



Şekil 2. 365 nm dalga boyunda, 88 W/m² ışık şiddetinde, %60 amplitüde, 37 °C' de, 300 mg TiO₂ kullanımında fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik proseslerle zamana karşı bakteri giderimi grafiği

365 nm'de farklı ışık şiddetlerinde, fotokatalitik prosesine ait zamana karşı bakteri giderim değerleri Şekil 3.' te gösterilmiştir. Buna göre 15. dakikada ortamda kalan bakteri konsantrasyonu değerleri sırasıyla 44 ve 88 W m⁻² ışık şiddetlerinde yaklaşık

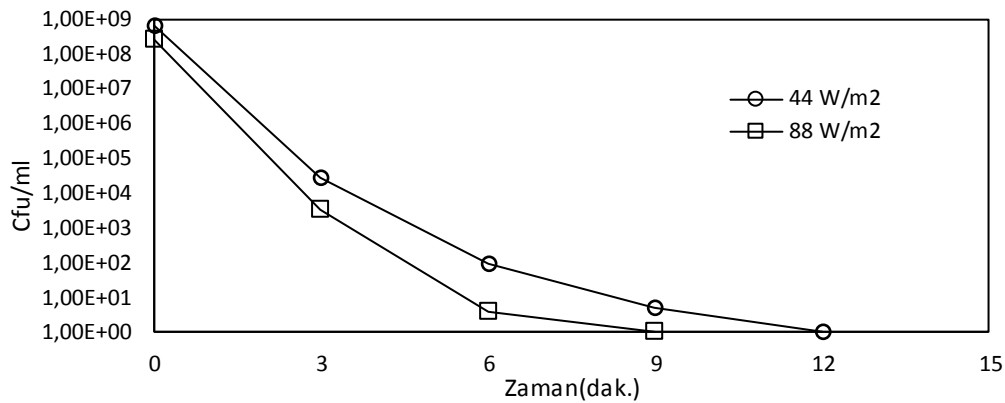
olarak, 1.7x10⁵ ve 9x10³ cfu ml⁻¹ 'dir iken 30. dakikada ise sırasıyla 1x10² ve 2 cfu ml⁻¹ 'dir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere fotokatalitik uygulamada kullanılan ışık şiddetinin miktarı arttıkça bakteri giderimi daha fazla olmaktadır.



Şekil 3. 365 nm dalga boyunda, %60 amplitüdde, 37 °C' de, 300 mg TiO₂ kullanımında fotokatalitik proseste farklı ışık şiddetlerinde zamana karşı bakteri giderimi grafiği

365 nm'de farklı ışık şiddetlerinde, sonofotokatalitik prosese ait zamana karşı bakteri giderim değerleri Şekil 4.' te gösterilmiştir. Buna göre 3. dakikada ortamda kalan bakteri konsantrasyonu değerleri sırasıyla 44 ve 88 W m⁻² ışık şiddetlerinde yaklaşık olarak, 3x10⁴ ve 3.4x10³ cfu ml⁻¹'dir iken 6. dakikada ise sırasıyla 1x10² ve 4 cfu ml⁻¹ 'dir. Bakterilerin tamamının giderimi 44 W m⁻² ışık şiddetinde 12. dakikadan sonra görülürken, 88 W m⁻² ışık şiddetinde 9. dakikadan sonra görülmüştür. Sonuçlardan da görüldüğü üzere sonofotokatalitik uygulamada kullanılan ışık şiddetinin miktarı arttıkça bakteri giderimi daha fazla olmaktadır. Ancak fotokatalitik ve sonofotokatalitik uygulamalar karşılaştırıldığında ise sırasıyla 44 ve 88 W m⁻² ışık

şiddetlerinde ortamda kalan ortalama 1x10² ve 5 cfu ml⁻¹ bakteri konsantrasyonuna fotokatalitik uygulamada 30. dakikada ulaşılırken, sonofotokatalitik uygulamada 6. dakikada ulaşılmaktadır. Buradan da sonofotokatalitik uygulamanın bakteri gideriminde 5 kat daha hızlı ve etkili bir yöntem olduğu görülmektedir. Ayrıca ışık şiddetleri kendi arasında karşılaştırıldığında 88 W m⁻² değerindeki bakteri giderimleri 44 W m⁻² değerindeki bakteri gideriminden çok daha hızlı ve fazladır. Bunun sebebi 88 W m⁻² kullanıldığında birim yüzeye düşen ışın miktarı daha fazla olacağından oksitleyici ve bozundurucu özelliğe sahip olan OH* radikallerinden ortamda daha fazla üretilecektir. Bu da daha fazla bakteri giderimine sebep olacaktır.



Şekil 4. 365 nm dalga boyunda, %60 amplitüdde, 37 °C' de, 300 mg TiO₂ kullanımında sonofotokatalitik proseste farklı ışık şiddetlerinde zamana karşı bakteri giderimi grafiği

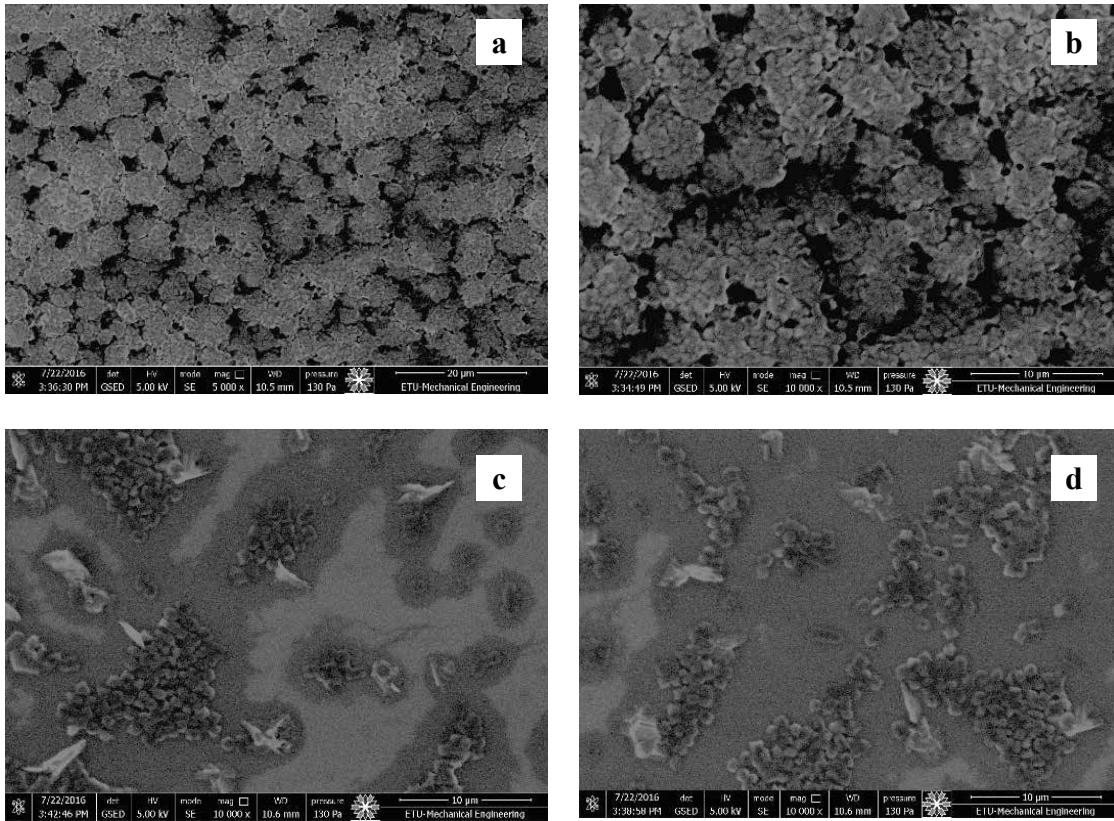
Denemeler sonucu elde edilen verilerden çizilen grafiklerden ve sonuçlardan da görüldüğü üzere

kullanılan üç yöntem olan sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik proseslerinden bakteri giderimi

üzerine en etkili olanı sonofotokatalitik prosesidir. Bu sonuç ortamda oluşan OH* radikallerine dayandırılabilir. Bilindiği üzere hidroksil radikalleri bileşik ve ara ürünlere etki eden kuvvetli oksitleyicilerdir (Gogate and Pandit, 2004; Isaev et al., 2011; Ahmeda, 2014; Volkova, 2015; Yetim and Tekin, 2016). Prosesler ayrı ayrı kullanıldıklarında daha az hidroksil radikali üretilebilirken, eşzamanlı olarak birlikte kullanıldıklarında üretilebilecek hidroksil miktarı artacağından, canlı yapıya nüfuz etmeleri de daha etkili olacaktır (Gogate and Pandit, 2004; Konstantinou, 2004; Daneshvar, 2004; Guo et al., 2011).

Ayrıca sonuçlar incelendiğinde sonolitik ve sonofotokatalitik proseslerin fotokatalitik prosesden çok daha fazla etkili oldukları görülmektedir. Sonokimyanın kullanılması ile bu etkinin artması hem OH* radikalleri hem de kaviteasyon olayı ile açıklanabilmektedir. Şöyle ki; sonoliz de oluşturulan OH* radikalleri suyun homolizi sonucu meydana gelmektedir. Su, ultrases enerjisine yani sonokimyaya tabi tutulduğunda suyun etrafındaki gaz ve buharı içeren kaviteasyon kabarcıklarının oluşumu ve çökmesiyle çok yüksek sıcaklık ve basıncın meydana geldiği, hot spot denen olay meydana gelir (Crum et al. 1999; Ince et al., 2001; Gogate and Pandit, 2004). Çökme ile birlikte kimyasal reaksiyon başlar ve kabarcıkların serbest radikal boşluklarına doğru termolitik dağılması söz konusu olur. Ya da gaz-sıvı ara yüzeyinde veya sıvıda çözülmüş çözünenin serbest radikal oksidasyonuna doğru dağılması söz konusudur (Ince et al., 2001; Tezcanlı and Ince, 2004; Gogate and Pandit, 2004). Bu kabarcıklar katalizör yüzeyine kuvvetli bir şekilde çöktüğünde çukurcuk ve porlar oluşturabilirler. Böylece katalizörün yüzeyi alanı bu çukurcuk ve porlarla artabilir. Ayrıca sonoliz katalizör yüzeyini oldukça iyi temizleyebilen bir prosesdir (Gogate and

Pandit, 2004). Bütün bunların sonucunda katalizör yüzey alanı daha fazla OH* radikalinin oluşması için artar ve böylece daha fazla OH* radikali oluşabilir. Böylece oluşan daha fazla miktardaki OH* radikalleri daha büyük miktarlarda bakteride oksidasyona sebep olarak giderimi hızlandırabilmektedir. Bütün bunların yanında sonolizin bir etkisi de, kaviteasyon oluşumu sırasında meydana gelen hot spot olayında ortaya çıkan çok yüksek sıcaklık ve basınç sonucunda canlı organizmaların hücrelerinde patlatma meydana getirmesi ve böylece bakteri gideriminin çok daha kısa sürede ve etkili bir biçimde oluşmasını sağlamasıdır. Bakterilerin işleme tabi tutulmadan önceki ve fotokatalitik, sonolitik ve sonofotokatalitik proseslere tabi tutulan bakterilere ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.a, b., c. ve d.'de görülmektedir. Proseslerdeki karşılaştırmaların yapılabilmesi için her üç proses için de 3. dakikadaki bakterilerin SEM görüntüleri alınmıştır. Buna göre fotokatalitik prosesin uygulandığı Şekil 5.b. SEM görüntüsünden de görüldüğü gibi, 3. dakikada bakteriler birbirlerinden ayrılmaya ve yapılarında hasarlar meydana gelmeye başlamıştır. Şekil 5.c.'de yer alan sonolitik prosesin 3. dakikasında çekilen SEM görüntüsünden de anlaşılacağı üzere bakteri yapılarındaki bozunmalar artarak ölü hücreler bünyeden oldukça fazla bir şekilde ayrılmış ve ortamda kalan bakteri miktarı çok düşmüştür. Şekil 5.d.'de yer alan sonofotokatalitik prosesin 3. dakikasında çekilen SEM görüntüsünde ise hem fotokatalitik yöntemin hem de sonolizin birlikte eşzamanlı kullanımı ile bakteri yoğunluğundaki seyrekleşme artmış, yani bünyeden çok fazla sayıda bakteri hücrelerinin ölümü ile koparak uzaklaşmalar gerçekleşmiştir. SEM görüntülerinden de bu üç proses arasından en etkili yöntemin sonofotokatalitik yöntem olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5. *Salmonella typhi* nin SEM görüntüsü **a)** İşlem görmemiş, **b)** 365 nm dalga boyunda, 44 W/m² ışık şiddetinde, 300 mg TiO₂ ile fotokatalitik prosesinin 3. dakikasına ait, **c)** % 60 amplitüd ultrases enerjisi kullanımında sonolitik prosesinin 3. dakikasına ait, **d)** 365 nm dalga boyunda, 44 W/m² ışık şiddetinde, 300 mg TiO₂ ve % 60 amplitüd ultrases enerjisi ile sonofotokatalitik prosesinin 3. dakikasına ait

SONUÇ

Bu çalışmada bakteri gideriminde sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için *Salmonella typhi* RSHMB 96051 bakterisi kullanılmıştır. Bu proseslerin etkilerini araştırmak için farklı ışık şiddetleri kullanılmıştır. Her bir yöntemin ve farklı ışık şiddetlerinin bakteri giderimindeki etkilerini inceleyebilmek için sonolitik, fotokatalitik ve sonofotokatalitik proseslerinde oluşan OH* radikallerini kullanılan katalizör miktarından bağımsız kılmak için, kullanılan TiO₂ fotokatalizörünün konsantrasyonu bütün denemelerde 1 g/l olarak sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Her iki ışık şiddetinde de (44 - 88 W m⁻²) bakteri giderimindeki en etkili yöntemin daha fazla OH* radikalının üretildiği ve aynı zamanda da hot-spot olayının gerçekleştiği sonofotokatalitik yöntem olduğu tespit edilmiştir.

- Işık şiddetlerinin etkisi karşılaştırıldığında, her üç proses için de 88 W m⁻² ışık şiddetinin uygulandığı denemelerdeki bakteri gideriminin daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi birim alana düşen ışık miktarının daha fazla olmasıyla açıklanmaktadır.

- En fazla bakteri giderimi 88 W m⁻² ışık şiddetinin kullanıldığı sonofotokatalitik denemede tespit edilmiştir. Bunun sebebi de, birim yüzeye düşen ışık miktarının fazla olması, ortamdaki OH* radikallerinin hem sonolizden hem de fotokatalizden üretildiği için fazla sayıda bulunmaları, ayrıca sonolizden kaynaklanan hot spot olayı ile hücrelerin daha kolay bertaraf edilmesi ve yine sonolizinin etkisi ile katalizör yüzeyinin temizlenerek ve kaviteasyonlardan dolayı katalizör yüzeyinde oluşan çukurcuk ve porların katalizörün yüzey alanını artırması ile daha kolay ve fazla reaksiyonun gerçekleşmesi ile (özellikle OH* radikalleri reaksiyonlarının) çok daha etkili bakteri gideriminin sağlanmasına dayandırılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmeda A Y, Kandiel T A, Ivanova I, Bahnmann D, 2014. Photocatalytic and photoelectrochemical oxidation mechanisms of methanol on TiO₂ in aqueous solution. *Appl. Surf. Sci.*, 319: 44-49.
- Barrett M, Fitzhenry K, O'Flaherty V, Dore W, Keaveney S, Cormican M, Rowan N, Clifford E, 2016. Detection, fate and inactivation of pathogenic norovirus employing settlement and UV treatment in wastewater treatment facilities. *Science of the Total Environment*, Article in Press.
- Bella S W Ho, Tam T-Y, 2000. Rapid Enumeration of Salmonella in Environmental Waters and Wastewater. *Water Research*, 34: 2397-2399.
- Behnajady M A, Modirshahla N, Hamzavi R, 2006. Kinetic study on photocatalytic degradation of C.I. Acid Yellow 23 by ZnO photocatalyst. *J. Hazard. Mater. B*, 133: 226-232.
- Brooks J P, Adeli A, McLaughlin M R, 2014. Microbial ecology, bacterial pathogens, and antibiotic resistant genes in swine manure wastewater as influenced by three swine management systems. *Water Research*, 57: 96-103.
- Cabral J P S, 2010. Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 7: 3657-3703.
- Crum L A, Mason T J, Reisse J L, Suslick K S, 1999. Sonochemistry and Sonoluminescence, Kluw. Aca, Dordrecht, 363 p.
- Daneshvar N, Rabbani M, Modirshahla N, Behnajady M A, 2004. Kinetic modeling of photocatalytic degradation of Acid Red 27 in UV/TiO₂ process. *J. Photochem. Photobiol A: Chemistry* 168: 39-45.
- Ertugay N, Acar F N, 2014. The degradation of Direct Blue 71 by sono, photo and sonophotocatalytic oxidation in the presence of ZnO nanocatalyst. *Appl. Surf. Sci.* 318: 121-126.
- Farmer J, Brenner F W H, 2003. The Genus *Vibrio* and *Photobacterium*. In *The Prokaryotes: An Evolving Electronic Resource for the Microbiological Community*. 3th ed.; M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, Eds., Spr.-Verlag, NY, USA 3.14p.
- Fuhrmann S, Pham-Duc P, Cissé G, Tram N T, Ha H T, Dung D T, Ngoc P, Nguyen-Viet H, Vuong T A, Utzinger J, Schindler C, Winkler M S, 2016. Microbial contamination along the main open wastewater and storm water channel of Hanoi, Vietnam, and potential health risks for urban farmers. *Science of the Total Environment*, Article in Press.
- Giannakis S, López M I P, Spuhler D, Pérez J A S, Ibáñez P F, Pulgarin C, 2016. Solar disinfection is an augmentable, in situ-generated photo-Fenton reaction—Part 2: A review of the applications for drinking water and wastewater disinfection. *Applied Catalysis B: Environmental*, 198: 431-446.
- Gogate P R, Pandit A B, 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research* 8: 553-597.
- Guo M Y, Ching N A M, Liu F, Djurić A B, Chan W K, 2011. *Appl. Catal. B-Environ.* 107: 150.
- http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/7d16d00201083a2_ek.pdf?dergi=142 (Erişim tarihi: 26.06.2016).
- Huang Z, Maness P-C, Blake D M, Wolfrum E J, Smolinski S L, Jacoby W A, 2000. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *J. Photochem. Photobiol A*, 130: 163-170.
- Ince N H, Tezcanli G, Belen R, Apikyan I G, 2001. Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental applications. *Appl. Catal. B: Environ.* 29: 167-176.
- Isaev A B, Magomedova G A, Zakargaeva N A, Adamadzieva N K, 2011. Influence of oxygen pressure on the photocatalytic oxidation of the azo dye Chrome Yellow with TiO₂ as the catalyst. *Kinet. Catal.*, 52: 197.
- Konstantinou I K, Albanis T A, 2004. TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: Kinetic and mechanistic investigations. *Appl. Catal. B: Environ.* 49: 1-14.
- Krzyzanowski Jr F, Lauretto M S, Nardocci A C, Sato M I Z, Razzolini M T P, 2016. Assessing the probability of infection by Salmonella due to sewage sludge use in agriculture under several exposure scenarios for crops and soil ingestion. *Science of the Total Environment*, 568: 66-74.
- Lonigro A, Rubino P, Lacasella V, Montemurro N, 2016. Faecal pollution on vegetables and soil drip irrigated with treated municipal wastewaters. *Agricultural Water Management*, Article in press.
- Lopez-Velasco G, Tomas-Callejas A, Sbodio A O, Pham X, Wei P, Diribsa D, Suslow T V, 2015. Factors affecting cell population density during enrichment and subsequent molecular detection of Salmonella enterica and Escherichia coli O157:H7 on lettuce contaminated during field production. *Food Control*, 54: 165-175.
- Masarikova M, Manga I, Cizek A, Dolejska M, Oravcova V, Myskova P, Karpiskova R, Literak I, 2016. Salmonella enterica resistant to antimicrobials in wastewater effluents and black-headed gulls in the Czech Republic, 2012. *Science of the Total Environment* 542: 102-107.
- Monteagudo J M, Duran A, Martin I S, Garcia S, 2014. Ultrasound-assisted homogeneous photocatalytic degradation of Reactive Blue 4 in aqueous solution. *Appl. Catal. B.*, 152: 59-67.
- Nissinen T K, Miettinen I T, Martikainen P J, Vartiainen T, 2002. Disinfection by-products in Finnish drinking waters. *Chemosphere*, 48: 9-20.
- Pigeot-Rémya S, Simonet F, Errazuriz-Cerda E, Lazzaroni J C, Atlane D, Guillard C, 2011. Photocatalysis and disinfection of water: Identification of potential bacterial targets. *Applied Catalysis B: Environmental* 104: 390-398.
- Rook J J, 1974. Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *Water Treat. Exam.*, 23: 234.
- Sallach J B, Zhang Y, Hodges L, Snow D, Li X, Bartelt-Hunt S, 2015. Concomitant uptake of antimicrobials and Salmonella in soil and into lettuce following wastewater irrigation. *Environmental Pollution*, 197: 269-277.
- Tanga C, Bai H, Liua L, Zanc X, Gao P, Suna D D, Yand W, 2016. A green approach assembled multifunctional Ag/AgBr/TNF membrane for clean water production & disinfection of bacteria through utilizing visible light. *Applied Catalysis B: Environmental*, 196: 57-67.
- Tezcanli G, Ince N H, 2004. Individual and combined effects of ultrasound, ozone and UV-irradiation: a case study with textile dyes. *Ultrasonics*, 42: 603-609.
- Volkova A V, Nemeth S, Skorb E V, Andreeva D V, 2015. Highly efficient photodegradation of organic pollutants assisted by sonoluminescence. *Photochem. Photobiol.*, 91: 59-67.
- Wang W, Huang G, Yu J C, Wong P K, 2015. Advances in photocatalytic disinfection of bacteria: Development of photocatalysts and mechanisms. *Journal of Environmental Sciences*, 34: 232 - 247.
- Wu C H, 2008. Effects of sonication on decolorization of C.I. Reactive Red 198 in UV/ZnO system. *J. Hazard. Mater.* 153: 1254-1261.
- Yetim T, Tekin T, 2016. A Kinetic Study on Photocatalytic and Sonophotocatalytic Degradation of Textile Dyes. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, Online First: 8535.
- Zyouda A, Dwikat M, Al-Shakhshir S, Ateeq S, Shteiwi J, Zu'bi A, Helal M H S, Campet G, Park D H, Kwon H, Kim T W, Kharooof M, Shawahna R, Hilal S H, 2016. Natural dye-sensitized ZnO nano-particles as photo-catalysts in complete degradation of E. coli bacteria and their organic content. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 328: 207-216.