

Mikrobiyel Yüzey Aktif Maddeler ve Çevresel Uygulamalarda Kullanımı

Ülküye Dudu Gül¹

Özet

Biyosürefektanlar adı da verilen mikrobiyel yüzey aktif maddeler mikroorganizmalar tarafından üretilen su veya sıvı bir çözeltide yüzey gerilimini düşüren moleküllerdir. Mikrobiyel yüzey aktif maddeler üretim maliyetlerinin ve toksisitesinin düşük, yüksek oranda biyoparçalanabilir ve çevreye uyumlu olması gibi özelliklerinden dolayı kimyasal (sentetik) yüzey aktif maddelere göre çevresel açıdan daha avantajlıdır. Mikrobiyel yüzey aktif maddeler çevresel kontrolde toprak ve sudaki petrol atıkları, Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH) ve pestisitler gibi kirleticilerin biyodegradasyonunu artırıcı etkisinin yanı sıra toprak ve sudan ağır metal gideriminde de etkin bir şekilde rol almaktadırlar. Bu bağlamda mikrobiyel yüzey aktif maddeler çevresel uygulamalarda kullanım için gelecek vaat eden yüzey aktif moleküllerdir. Bu çalışmada mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çevre kirliliği kontrolünde kullanım alanları ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Mikrobiyel yüzey aktif madde, biyodegradasyon, çevre

GİRİŞ

Suda veya sıvı bir çözeltide çözündükleri zaman yüzey gerilimini düşüren maddelere yüzey aktif maddeler (sürefektanlar) denir (1). Bu maddeler su-petrol, hava-su, sıvı-katı yüzeyi gibi farklı yüzeyleri bir araya getiren özellik gösterirler (2). Üretim şekillerine göre sentetik (kimyasal) ve mikrobiyel yüzey aktif maddeler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sentetik yüzey aktif maddeler organik kimyasal reaksiyonlar sonucu elde edilirken, mikrobiyel yüzey aktif maddeler bakteri, mantar ve maya gibi mikroorganizmaların biyolojik işlevleri sonucu üretilip hücre dışına salgılanırlar.

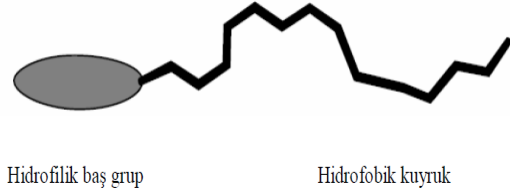
Mikrobiyel yüzey aktif maddeler sentetik olanlara kıyasla düşük üretim maliyetlerinin (3) yanı sıra düşük toksisite, yüksek oranda biyoparçalanabilirlik, çevresel açıdan uyumluluk gibi özellikleri nedeniyle kullanımları çevresel açıdan daha avantajlıdır (4). Çevresel avantajları nedeniyle kimyasal yollarla üretilenler yerine mikroorganizmalar tarafından üretilen yüzey aktif maddelere olan ilgi daha da artmaktadır. Bu çalışmada mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çevresel kontrolde güncel ve potansiyel uygulama alanlarından söz edilecektir.

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Bilecik. Yazışmadan Sorumlu Yazarın e-posta Adresi: ulkuyedudugul@gmail.com

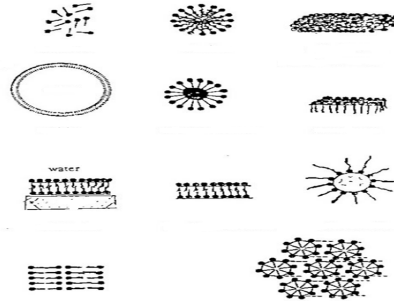
YÜZEY AKTİF MADDELERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Yüzey aktif maddeler hidrofilik (su-sever) baş ve hidrofobik (yağ-sever) kuyruk kısımlarından oluşan amfoterik özellik gösteren amfilik bileşiklerdir (2). Molekülün su sever kısmı küresel formlar, yağ sever kısmı ise çubuk formlar oluşturur (Şekil 1).

Molekülün su sever kısmı aynı zamanda yük taşıyan kısımdır. Yüzey aktif maddeler düşük konsantrasyonlarda monomer halinde bulunurlar. Her monomer elektriksel yüke sahiptir (1). Belli konsantrasyonlara ulaşan (Kritik Misel Konsantrasyonu- KMK) moleküller çeşitli şekillerde "miseller" oluştururlar. Miseller; küresel, çubuk, silindirik şekilli ve sekiz köşeli olabilirler (Şekil 2). Misel oluşumu moleküllerin hidrokarbon kısımları arasındaki hidrofobik etkileşmenin baş gruplar arasındaki elektrostatik itme ve hidratasyon ile dengelenmesi sonucu oluşur. Miseller yapı ancak bir kritik misel konsantrasyonunun (KMK) üzerinde molekül ve iyonların bir araya gelmesiyle meydana gelir ayrıca şekil ve büyüklük bakımından değişebilen ve sürekli hareket halinde olan sistemlerdir (5, 6). Yüzey aktif madde miselleri farklı şekillerde bulunmaktadır (7).



Şekil 1. Yüzey aktif madde molekülünün şematik gösterimi



Şekil 2. Yüzey aktif madde misellerinin farklı şekilleri (7)

Mikrobiyel Yüzey Aktif Maddeler

Mikroorganizmalar tarafından üretilen yüzey aktif maddelerdir. Genel olarak hidrofilik kısımları aminoasit veya anyon ya da katyon peptitlerden oluşurken, hidrofobik kısımları doymuş ve doymamış yağ asitlerinden oluşur. Katı, sıvı ve gaz molekülleri arasındaki yüzey ve iç yüzey gerilimini azaltabilme özelliğine sahip moleküllerdir. Bu özellikleri nedeniyle modern endüstrinin hemen her sektöründe kullanılmaktadır. Mikrobiyel yüzey aktif maddeler ziraat, maden teknolojileri ve petrol üretimi gibi alanlarda ıslatıcı ajan ve köpük ajan olarak kullanılmalarının yanı sıra ilaç ve kozmetik sanayinde emulsifiye edici madde olarak kullanılırlar (4).

Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin sınıflandırılması

Mikrobiyel yüzey aktif maddeler kimyasal yapılarına ve mikrobiyel orijinlerine göre sınıflandırılmaktadır (8). Kimyasal yapılarına göre glikolipidler, lipopeptidler, fosfolipidler, partikuler sürfektanlar, polimerik sürfektanlar, yağ asitleri ve fosfolipidleri içeren karmaşık moleküller şeklinde sınıflandırılırlar (9).

Yüzey aktif madde üreten mikroorganizmalar

Mikrobiyel yüzey aktif maddeler çok çeşitli prokaryotik ve ökaryotik mikroorganizmalar tarafından üretilmektedir (Çizelge 1).

Yüzey aktif madde üretiminde kullanılan karbon kaynakları hidrokarbon, karbonhidrat ve bitkisel yağlardır. Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin üretimi ekonomik olarak sentetik olanlarla kıyaslanamaz ancak mikrobiyel üretimde maliyeti düşürmek amacıyla karbon kaynağı olarak; zeytinyağı, peynir veya un fabrikası atıkları gibi endüstriyel atıklar kullanılabilir.

Çizelge 1. Literatürde yer alan yüzey aktif madde üreten mikroorganizmalar (10, 11, 12)

Mikrobiyel Yüzey Aktif Madde	Sınıfı	Mikroorganizma
Glikoz Lipitler	Glikolipitler	<i>Alcanivorax borkumensis</i>
Ramnilipitler	Glikolipitler	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Trehalozlipitler	Glikolipitler	<i>Mycobacterium sp.</i>
Soforoz Lipitler	Glikolipitler	<i>Torulopsis bombicola</i>
Ornitin Lipitler	Lipopeptitler ve Lipoproteinler	<i>Myroides sp.</i>
Serrawettin	Lipopeptitler ve Lipoproteinler	<i>Serratia marcescens</i>
Viskonsin	Lipopeptitler ve Lipoproteinler	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
Surfektin / Subtilisin	Lipopeptitler ve Lipoproteinler	<i>Bacillus subtilis</i>
Polimiksin	Lipopeptitler ve Lipoproteinler	<i>Bacillus polymyxa</i>
Yağ Asitleri	Yağ Asitleri, Nötral Lipitler, Fosfolipitler	<i>Corinebacterium lepus</i>
Nötral Lipitler	Yağ Asitleri, Nötral Lipitler, Fosfolipitler	<i>Nocardia erythropolis</i>
Fosfolipitler	Yağ Asitleri, Nötral Lipitler, Fosfolipitler	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>
Emülsan	Polimarik Sürfektanlar	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
Biodispersan	Polimarik Sürfektanlar	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
Liposan	Polimarik Sürfektanlar	<i>Candida lipolytica</i>
Protein A	Polimarik Sürfektanlar	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Vesiküller ve Fimbria	Partiküler Biyosürfektanlar	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>

Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin doğadaki rolleri

Çok çeşitli mikroorganizmalar tarafından üretilen yüzey aktif maddeler farklı yüzey özelliklerine sahip oldukları için doğadaki rolleri konusunda genelleme yapmak yerine her birinin ayrı ayrı analiz edilmesi gerekmektedir. Yüzey aktif maddelerin doğal rolleri ve üreten mikroorganizmada hangi fonksiyonu yaptıkları konularında çok az bilgi bulunmaktadır. Suda çözünmez substratlar üzerinde gelişen mikroorganizmaların bulunduğu ortama mikrobiyel yüzey aktif maddelerin eklenmiş ve bu maddelerin etki mekanizmasını araştıran deneyler yapılmıştır. Bu maddelerin suda çözünmez hidrofobik substratların yüzey alanını artırarak mikroorganizmaların yüzeylere tutunmasını kolaylaştırıcı veya yüzeylerden uzaklaştırılmasını düzenleyici fonksiyonlara sahip olduğu ileri sürülmüştür (9). Literatürde yer alan yüzey aktif madde üreten mikroorganizmalar Çizelge 1’de gösterilmiştir (10, 11, 12).

Mikrobiyel Yüzey Aktif Maddelerin Çevresel Kontrolde Kullanımı

Mikrobiyel yüzey aktif maddeler endüstriyel emülsiyonla baş etmede, petrol yayılımının kontrolünde, endüstriyel atıkların biyolojik gideriminde ve detoksifikasyonda kullanılabilirlerdir.

Mikrobiyel Yüzey Aktif Maddelerin Kirletici Biyodegradasyonuna etkisi

Petrol hidrokarbonların biyodegradasyonuna etkisi

Alkanlar, sikloalkanlar, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve resinler petrol hidrokarbonlara örnek teşkil etmektedir. Bu maddelerin biyodegradasyonuna mikrobiyel yüzey aktif maddelerin etkisi üzerine geçmişten günümüze çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Zhang ve Miller (13) 300 mg/L ramnolipidin oktadekan mineralizasyonunu %5'den %20'ye yükselttiğini göstermiştir. Beal ve Bett (14) tarafından yapılan çalışma sonuçlarına göre hegzadekan üzerinde gelişmekte olan yüzey aktif madde üreten mikroorganizmanın üretmeye göre yüzey hidrofobisitesi artmıştır ve ramnolipit hegzadekanın çözünürlüğünü 1.8'den 22.8 mg/L'ye kadar arttırmıştır. Noordman ve ark., (15) *P. aeruginosa* tarafından üretilen yüzey aktif maddenin hegzadekan degradasyonu üzerine etkisini çalışmış ve biyodegradasyonun olumlu yönde etkilendiğini göstermiştir. Rahman ve ark., (16) n-alkanların %87.4 petrol ve makine yağı ile kontamine olmuş çamurda biyoremediasyonunu araştırmıştır. Yapılan araştırma sonucuna göre Ramnolipid ilavesi ile çamurun %10'u olan C8- C11; C12- C21; C22- C31 ve C32- C40 alkanların %100; %83- 98; %80- 85 ve %57-73'ünün 56 günde biyolojik olarak parçalandığı görülmüştür (16). Aynı araştırmada zincir uzunluğu arttıkça biyodegradasyonun azaldığı bu durumun özellikle C32- C40 bileşiklerinde çok belirgin olduğu gösterilmiş ve ramnolipid ilavesinin bu çözünürlüğü az olan bileşiklerinin biyodegradasyonunu arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Polisiklik aromatik hidrokarbonların biyodegradasyonuna etkisi

Katran yağından oluşan polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) petrol rafinerisi ve kömür üretimi işlemleri sonucu oluşmaktadır ve yapılarındaki karbon sayısı arttıkça çözünürlüğü azaldığından bu maddelerin biyodegradasyonu zordur. Deschenes ve ark., (17) tarafından yapılan araştırma sonucunda *P. aeruginosa* UG2 suşunun ürettiği yüzey aktif madde kimyasal bir yüzey aktif madde olan SDS'den beş kat daha etkili olduğu ve dört halkalı PAH'ın çözünürlüğünü üç halkalıya göre daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Vipulanandan ve Ren (18) ramnolipid, anyonik (SDS) ve iyonik olmayan (TritonX-100) yüzey aktif maddelerin PAH ve Naftalinin çözünürlüğüne etkisini araştırmıştır. Ramnolipid Naftalinin çözünürlüğünü 30 kat arttırmıştır. Naftalin (30 mg/L) biyodegradasyonu 10 g/L ramnolipid bulunan ortamda 100 saat ve Triton X- 100 bulunan ortamda ise 40 gün sürmüştür. SDS bulunan ortamda ise Naftalin biyodegradasyonu gerçekleşmemiştir. Yapılan başka bir çalışmada ramnolipid üreten *Pseudomonas* sp. DS10- 129 ilavesinin benzinle kontamine olmuş toprağın biyoremediasyonunu hızlandırdığı görülmüştür (19). Straube ve ark., (20) yüzey aktif madde üreten *P. aeruginosa* suş 64 ilavesinin PAH (1300 mg/kg) ve Pentaklorofenol (PCP) (1500 mg/kg) ile kontamine toprakta biyoremediasyonunu arttırdığını göstermiştir.

Schippers ve ark., (21) fenantren biyodegradasyonuna sophorolipidlerin etkisini araştırmış ve araştırma sonucunda %10'luk toprak süspansiyonu içinde 36 saat sonunda 80 mg/L olan fenantren konsantrasyonunun 500 mg/L yüzey aktif madde bulunan ortamda 0.5 mg/L'ye, yüzey aktif madde bulunmayan ortamda ise 2.3 mg/L'ye düştüğünü göstermiştir.

Kontamine olmuş toprak sedimenlerinden izole edilmiş olan *Bacillus subtilis* O9 sü krozu substrat olarak kullanarak surfaktin üretmektedir (22). Ham olarak elde edilen surfaktinin gemi sintine atıklarına eklenerek biyodegradasyonu arttırıp arttırmadığı belirlenmiştir. Mikrobiyel yüzey aktif madde bulunan steril olmayan ortamda alifatik ve aromatik bileşiklerin daha hızlı parçalandığı tespit edilmiştir. Buna karşın n-C17 pristane degradasyonunu arttırmamıştır. Yapılan çalışmada surfaktin üretimi için daha pratik metotların geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Li ve ark., (23) petrolle kontamine olmuş topraktan 6 tane petrol parçalayan bakteri türü izole etmiştir. İzole edilen bakterilerden bir tanesi ramnolipit üretme yeteneğine sahiptir. Bu mikrobiyel yüzey aktif maddenin sudaki ve topraktaki KMK değeri 65 ve 185 mg/L olarak bulunmuştur. Bu ramnolipit (%0.01 ve 0.02)'in toprak ve sudaki dizel petrol biyodegradasyonuna etkisi araştırılmış ve ramnolipidin KMK değeri üzerindeki konsantrasyonlarda ortama eklendiğinde biyodegradasyonu arttırdığı belirlenmiştir.

Wang ve ark., (24) surfaktin ve ramnolipidin dizel giderimine etkisini çalışmıştır. Surfaktin bulunan ortamda (40 mg/L) bulunmayan ortama göre biyokütle üretimi ve dizel biyodegradasyonu 2 kat daha fazla gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonlarda (400 mg/L'ye kadar arttığında) antibiyotik etkisinden dolayı gelişme ve biyodegradasyon engellenmiştir. Ramnolipit (80 mg/L) 2 kat daha fazla attırmıştır ve dizelle kontamine toprağın iyileştirilmesinde ramnolipit kullanılabileceği gösterilmiştir.

Klorinli hidrokarbonların biyodegradasyonuna etkisi

Pentaklorofenoller ve poliklorinli bifeniller halojenli aromatik bileşiklere örnek teşkil etmektedir. Bu bileşiklerin stabilitesi ve toksisitesi çevre ve yerel sağlık açısından sorun oluşturmaktadır. Halojenli alifatik bileşikler için pozisyon ve halojenlerin sayısı biyodegradasyon mekanizmasını ve oranını belirlemede önemlidir. Bazı araştırmalar özellikle poliklorinli bifenil (PCB) biyodegradasyonu üzerine odaklanmıştır. *P. aeruginosa* suşunun ürettiği ramnolipid ilavesi ile *Alcaligenes eutrophus* tarafından PCB biyodegradasyonu kolaylaştırdığı gösterilmiştir (25).

Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin klorinli hidrokarbonların biyodegradasyonuna etkisi araştırılmıştır. Mikrobiyel yüzey aktif madde bulunan aktif çamur biyoreaktöründe 4 klorofenol (4-CP) biyodegradasyonu araştırılmıştır (26). Çalışmada aktifleştirilmemiş çamur kullanılarak kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) ve 4- CP, biyokütle ve substrat giderimi izlenmiştir. Mikrobiyel yüzey aktif maddenin bulunduğu ortamda biyodegradasyonun hızlandığı görülmüş ancak yüzey aktif maddenin biyodegradasyona etki mekanizması belirlenememiştir.

Clifford ve ark., (27) Ramnolipidle perkloretilen (PCE) giderimini değerlendirmiştir. PCE- Ramnolipid iç yüzey gerilimi 10 mN/m olarak belirlenmiştir. İç yüzey geriliminin biraz yüksek olması dikey hareketi düşürerek fayda sağlamıştır. Çalışma sonucuna göre ramnolipidin yüzey aktif madde ile hızlandırılmış PCE gideriminde kullanıma

elverişli olduğu saptanmıştır. Sodyum dodesil sülfat (SDS) ve mikrobiyel yüzey aktif madde (UH) tarafından PCE degradasyonu sürekli karıştırılmış reaktörler kullanılarak değerlendirilmiştir (28). Mikrobiyel yüzey aktif madde miktarı 500 mg/L'ye kadar arttığında PCE çözünürlüğü ve biyodegradasyonu artmıştır.

Pestisitlerin biyodegradasyonuna etkisi

Awasthi ve ark., (29) surfaktin üreten *Bacillus subtilis* kültürünün pestisit olan endosulfan biyodegradasyonunu artırma özelliği gösterdiğini saptamıştır. Mata-Sandoval (30) ramnolipidlerle sentetik yüzey aktif madde olan triton X 100 'ün pestisit olan trifluralin ve atrazin çözme kabiliyetleri üzerine yaptıkları araştırmada sentetik yüzey aktif maddenin tüm pestisitleri ramnolipide göre 2 kat daha fazla çözdüğünü göstermiştir. Ancak ramnolipidin trifluralin biyodegradasyonunu kolaylaştırmıştır. Mata-Sandoval (2001), (31) tarafından yapılan daha ileri bir çalışmada ramnolipid ve triton X 100 bulunan sıvı kültürlerde üç pestisit biyodegradasyonu test edilmiştir. Trifluralin biyodegradasyonu her iki yüzey aktif madde varlığında artarken, atrazininki düşmüştür. Perizin biyodegradasyonu ramnolipid konsantrasyonu 3 mM'ın altında olduğunda artmış fakat triton X 100 konsantrasyonu KMK'nın altında olduğunda engellenmiştir. Toprak çamurunda trifluralin degradasyonu her iki yüzey aktif madde konsantrasyonu arttığında düşmüştür. Ramnolipid konsantrasyonu arttığında perizin biyodegradasyon oranı düşmüş ancak giderimi artmıştır. Yapılan çalışmada ramnolipid konsantrasyonunda düşüş olduğu gözlenmiştir ki bu durum ramnolipidinde biyolojik olarak parçalandığının bir göstergesidir (31).

Kirletici Maddelerin Yıkamayla Uzaklaştırılmasına Mikrobiyel Yüzey Aktif Maddelerin Etkisi

Biyodegradasyon çalışmalarının yanı sıra bazı mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çözünürlüğü düşük olan bileşiklerin toprak ya da katı yüzeylerden uzaklaştırılmasına etkisinin araştırılması için deneyler yapılmıştır (32).

Petrol hidrokarbonların uzaklaştırılması

Urum ve ark., (33) lesitin, ramnolipit, saponin, tannin ve SDS gibi çeşitli yüzey aktif maddelerin petrolle kontamine olmuş toprağı yıkama özelliklerini karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmada sıcaklık (5, 20, 35 ve 50 °C), yüzey aktif madde konsantrasyonu (0.004, 0.02, 0.1 ve 0.5%), hacmi (5, 10, 15 ve 20 ml), çalkalama hızı (80, 120, 160 ve 200 rpm) ve yıkama zamanı (5, 10, 15 ve 20 dakika) test edilmiştir. Bir çok yüzey aktif madde için 50 °C ve 10 dakika optimal koşullar olarak belirlenmiştir. SDS, ramnolipit ve saponinin %79'dan fazla petrolü giderebildiği saptanmıştır.

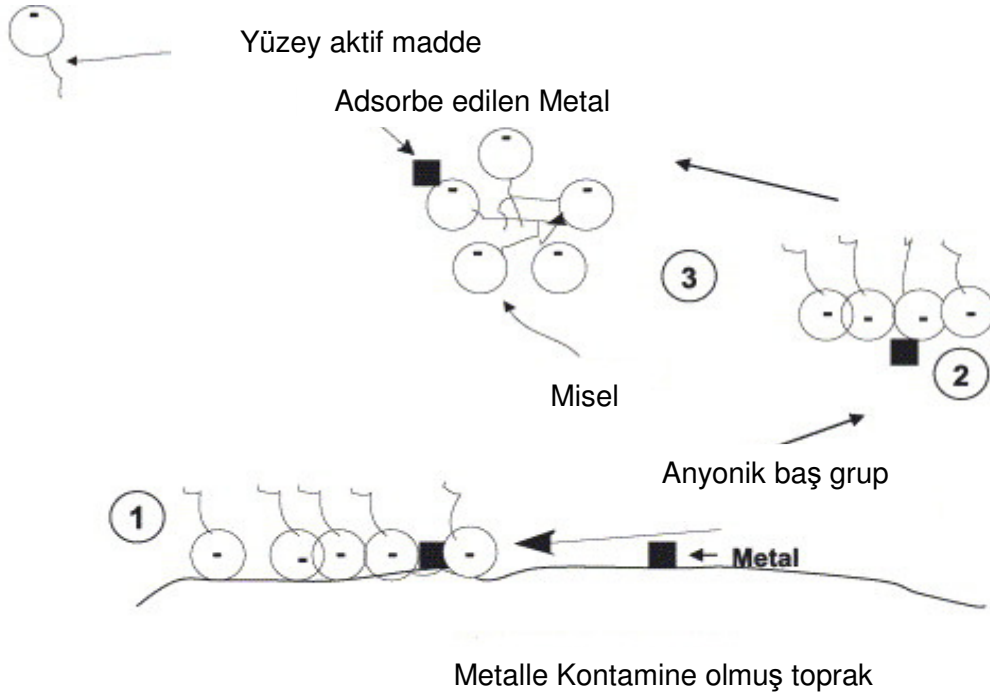
Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin atık hidrokarbonların giderimine etkisi Southam ve ark., (34) tarafından çalışılmıştır. Bakterilerin hidrokarbonları parçalayabilmesi için 25-50 nm kalınlığında olan yüzey aktif madde-petrol ara yüzeyine tutunması gerekmektedir. Petrolün emülsifiye olabilmesi için sadece %1 civarında mikrobiyel yüzey aktif madde yeterlidir. Petrol damlalarının mikrobiyel alımı sayesinde petrol üzerinde mikrobiyel gelişim meydana geldiği görülmüştür. Yapılan bu çalışmada TEM kullanılmıştır ancak hidrokarbon metabolizması ve yüzey aktif madde uygulamalarını içeren mekanizmanın daha detaylı çalışmalarla belirlenmesi gerekmektedir.

Shulga ve ark., (35) farklı bir petrol temizleme yaklaşımı uygulamış ve kıyı kumu ve kuş ve hayvanların tüylerinde bulunan petrolün temizlenmesi için mikrobiyel yüzey aktif madde kullanımını test etmiştir. *Pseudomonas* sp. PS- 17 tarafından üretilen yüzey aktif madde ve biyopolimer suyun yüzey gerilimini 29 mN/m'ye ve içyüzey gerilimini de hetana karşı 0.01 ve 0.07 mN/m'ye düşürmüştür. Bu araştırmanın sonuçları petrolle kontamine olmuş kıyı bölgesi kuşları ve hayvanlarından petrolün gideriminde mikrobiyel yüzey aktif maddelerin kullanılabilirliğini göstermiştir.

Ramnolipitlerle kirlenmiş topraktan stiren giderimi Guo ve Mulligan (36) tarafından araştırılmıştır. Araştırmada ramnolipidin stiren giderimi için yıkayıcı ajan olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre 1. gün sonunda 32.750 mg/kg stirenin % 70 den fazlası ve 5. gün sonunda da % 88.7'si giderilmiştir diğer taraftan 16.340 mg/kg stiren'in %90'ı ise 1. gün sonunda giderilmiştir. Yapılan ön testler sonunda zamanın önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Mikrobiyel yüzey aktif madde konsantrasyonunun stiren çözünürlüğüne etkisi lineer bir korelasyon göstermiştir. Ramnolipit tarafından topraktan % 70'den fazla giderilen stiren sızıntı suyu temizleme süreci ile bağlantılı olarak anaerobik biyokütle tarafından biyolojik olarak parçalanmıştır (36).

Ağır metal

Yüzey aktif maddeler KMK değerine yakın noktalara ulaştıklarında yarı miseller yapıyı oluşturarak toprak iç yüzeyinde birikinti oluşturmaktadırlar (Şekil 3). Toprak partikülleri arasında bulunan metal iyonları iç yüzey geriliminin düşürülmesi ve elektrostatik etkileşimlerle yüzey aktif madde yüzeyine tutunmaktadır. Toprağın suyla yıkanması sonucu ağır metaller misellerle birlikte uzaklaştırılmaktadır.



1. Yüzey aktif madde yarı misellerinin toprak iç yüzeyine birikimi; 2. İç yüzey geriliminin düşürülmesi ve elektrostatik etkileşimlerle metal giderimi; 3. Metalin misel içine tutunması

Şekil 3. Mikrobiyel yüzey aktif madde ile metal gideriminin potansiyel mekanizması (35)

Ramnolipitler anyonik karakterli olukları için kadmiyum, bakır, kurşun çinko gibi iyonik metalleri giderebildiği yapılan araştırmalarda gösterilmiştir (37, 38, 39).

Ramnolipitler tarafından kurşun giderimi araştırılmış ve 10 mM ramnolipit solüsyonu 10 yıkama sonunda kurşununun %15'inin uzaklaştırılmasını sağladığı gösterilmiştir (40). *P. aeruginosa* BS2 tarafından üretilen ramnolipidin kurşun ve kadmiyum ağır metallerinin topraktan uzaklaştırılmasına etkisi araştırılmış ve normal musluk suyu ile yıkanan toprak kolonundan %2.7 kadmiyum ve %9.8 kurşunun, ortama düşük konsantrasyonda Ramnolipit eklendiğinde ise 36 saatlik yıkama sonunda %92 kadmiyum ve %88 kurşunun uzaklaştırıldığını gösterilmiştir (41).

GELECEKTEKİ ARAŞTIRMALAR İÇİN TAVSİYELER

Son zamanlarda mikrobiyel yüzey aktif maddelerin ticari üretimi üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Yüzey aktif maddelerin üretim maliyetinin yüksek olması ticari uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır. Üretim maliyeti uygulamalardaki verimi arttıran ve ucuz ya da atık substratları kullanan yöntemlerin geliştirilmesiyle düşürülebilir (42). Mikrobiyel yüzey aktif madde üretimi ekonomik olarak kimyasal yüzey aktif madde üretimi ile kıyaslanamaz ancak mikrobiyel yüzey aktif madde üretim maliyetini düşürmek amacıyla karbon kaynağı olarak; zeytinyağı, peynir veya un fabrikası atıkları gibi endüstriyel atıklar kullanılabilir (43, 44, 45). Ramnolipid ve surfaktin gibi mikrobiyel yüzey aktif maddelerin biyosentezi ile ilgili çok fazla çalışma olmasına karşın metabolik yol ve birincil hücre metabolizması ile ilgili çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Bu alanda yapılacak çalışmalar ekonomik açıdan uygun ve verimli yüzey aktif madde üretimini arttırıcı yolların tespitini sağlayacaktır. Mikroorganizmalar tarafından üretilen yüzey aktif maddeler çok çeşitli çevresel uygulamalarda kullanılmaktadır (Çizelge 2). Bu yüzey aktif maddelerin üretim maliyetinin düşürülmesi çevresel kontrolde kullanımını yaygın hale getirecektir.

Çizelge 2. Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çevresel kontrolde kullanımı

Mikrobiyel Yüzey Aktif Madde	Kirletici	Mekanizma	Kaynak
Ramnolipit	Petrol Atıkları	Biyodegradasyon	14- 17
	Petrol Atıkları	Yıkama ile uzaklaştırma	36, 37
	Ağır Metal	Yıkama ile uzaklaştırma	38- 42
	PAH	Biyodegradasyon	19- 21
	Dizel	Biyodegradasyon	25
Surfaktin	Pestisit	Biyodegradasyon	31, 32
	Dizel	Biyodegradasyon	25
	Pestisit	Biyodegradasyon	30
	Ağır Metal	Yıkama ile uzaklaştırma	43

SONUÇ

Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çevre kirliliğini kontrolde kullanılabilme potansiyeli olduğu gösterilmiştir. Hem organik hem de inorganik kirleticiler biyoremediasyon ya da biyodegradasyon gibi mekanizmalarla giderilebilmektedir. Mikrobiyel yüzey aktif maddeler kirletici çözünürlüğünü arttırmak yoluyla biyodegradasyona katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Mikrobiyel yüzey aktif maddeler düşük toksisitelerinden dolayı remediasyon teknolojilerinde kullanıma oldukça uygundur. Mikrobiyel yüzey aktif maddelerin çevre kirliliğinin kontrolündeki yüksek performansı bu maddelerin çevresel kontrolde daha yaygın bir şekilde kullanılacağına göstergesidir.

KAYNAKLAR

1. Homberg, K., Jönsson, B., Kronberg, B. ve Lindman, B., 2003. Surfactants and polymers in aqueous solution 2nd edition. John Wiley & Sons Ltd: 259, İngiltere.
2. Hamme, J.D.V., Singh, A. ve Ward, O. P., 2006. Physiological aspects Part 1 in a series of papers devoted to surfactants in microbiology and biotechnology. Biotech. Ad. 24: 604–620
3. Heyd, M., Kohnert, A., Tan, T.H., Nusser, M., Kirschhofer, F., Brenner-Weiss, G., Franzreb, M. ve Berensmeier, S., 2008. Development and trends of biosurfactant analysis and purification using rhamnolipids as an example. Anal Bioanal Chem. 391: 1579-90.
4. Gautam, K.K., 2006. Microbial Surfactants: A Review. J Oleo Sci. 55: 155-166.
5. Anionson, E.A.G., 1976. Theory of the Kinetics of Micellar Solutions of Ionic Surfactants. J. Phys. Chem. 80: 905.
6. Atkins, P. W., 1998. Fizikokimya. Oxford University Press.
7. mnh-tr.com/p21.html , 2010
8. Muherjee, S., Das P. Ve Sen R., 2006. Towards Commercial Products of Microbial Surfactans. Trends in Biotechnology. 6: 11
9. Rosenberg, E., 2006. Biosurfactants. Prokaryotes Chaptetr 3.7, 1: 834- 849.
10. Desai, J.D. ve Banat, I.M., 1997. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 61: 47–64.
11. Maneerat, S., 2005. Production of biosurfactants using substrates from renewable-resources Songklanakarın. J. Sci. Technol. 27(3) : 675-683.
12. Muthusamy, K., Gopalakrishnan, S. ve Ravi, T.K., 2008. Biosurfactants: properties, commercial production and application. Current Science. 94: 736-774.
13. Zhang, Y. ve Miller, R.M., 1992. Enhanced octadecane dispersion and biodegradation by a Pseudomonas rhamnolipid surfactant (biosurfactant). Applied and Environmental Microbiology. 58: 3276– 3282.
14. Beal, R. ve Betts, W.B., 2000. Role of rhamnolipid biosurfactants in the uptake and mineralization of hexadecane in Pseudomonas aeruginosa. Journal of Applied Microbiology. 89: 158–168.
15. Noordman, W.H., Burseau, M.L. ve Janssen, D.B., 2000. Adsorption of a multi-component rhamnolipid surfactant to soil. Environmental Science and Technology. 34: 832– 838.
16. Rahman, K.S.M., Rahman, T.J., Kourkoutoas, Y., Petsas, I., Marchant, R. ve Banat, I.M., 2003. Enhanced bioremediation of n-alkane in petroleum sludge using bacterial consortium mended with rhamnolipid and micronutrients. Bioresource Technology. 90: 159–168.

17. Deschenes, L., Lafrance, P., Villeneuve, J.-P. ve Samson, R., 1994. The impact of a biological and chemical anionic surfactants on the biodegradation and solubilization of PAHs in a creosote contaminated soil. Presented at the Fourth Annual Symposium on Groundwater and Soil Remediation, September 21–23, Calgary, Alberta
18. Vipulanandan, C. ve Ren, X., 2000. Enhanced solubility and biodegradation of naphthalene with biosurfactant. *Journal of Environmental Engineering*. 126: 629–634.
19. Rahman, K.S.M., Banat, I.M., Rahman, T.J., Thayumanavan, T. ve Lakshmanaperumalsamy, P., 2002. Bioremediation of gasoline contaminated soil by a bacterial consortium amended with poultry litter, coir pith and rhamnolipid biosurfactant. *Bioresource Technology*. 81: 25–32.
20. Straube, W.L., Nestler, C.C., Hansen, L.D., Ringleberg, D., Pritchard, P.J. ve Jones-Meehan, J., 2003. Remediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) through landfarming with biostimulation and bioaugmentation. *Acta Biotechnologica*. 2–3: 179–196.
21. Schippers, C., Geßner, K., Muller, T. ve Scheper, T., 2000. Microbial degradation of phenanthrene by addition of a sophorolipid mixture. *Journal of Biotechnology*. 83: 189–198.
22. Olivera, N.L., Commendatore, M.G., Moran, A.C. ve Esteves, J.L., 2000. Biosurfactant-enhanced degradation of residual hydrocarbons from ship bilge wastes. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 25: 70–73.
23. Li Y-Y, Zheng X-L ve Li B., 2006. Influence of biosurfactant on the diesel oil remediation in soil-water system. *J Environ Science*. 18:587–590.
24. Whang, L-M., Liu, P-W.G., M, C-C. ve Cheng, S-S., 2008. Application of biosurfactants, rhamnolipid and surfactin for enhanced biodegradation of diesel-contaminated water and soil. *J Hazard Mater.*, 151:155–163.
25. Robinson, K.G., Ghosh, M.M. ve Shi, Z., 1996. Mineralization enhancement of non-aqueous phase and soil-bound PCB using biosurfactant. *Water Science and Technology*. 34, 303–309.
26. Uysal, A ve Turkman, A., 2007. Biodegradation of 4-CP in an activated sludge reactor: effects of biosurfactant and the sludge age. *J. Hazard. Mater.* 148:151–7.
27. Clifford, J.S., Ionnidis, M.A. ve Legge, R.L., 2007. Enhanced aqueous solubilization of tetrachloroethylene by a rhamnolipid biosurfactant. *J. Colloid. Interfac. Sci.* 305:361–4.
28. Harenda, S. ve Vipulanandan, C., 2008. Degradation of high concentrations of PCE solubilized in SDS and biosurfactant with Fe/Ni metallic particles. *Colloid Surf A Physico Eng Aspects*. 322:6–13.
29. Awashti, N., Kumar, A., Makkar, R. ve Cameotra, S., 1999. Enhanced biodegradation of endosulfan, a chlorinated pesticide in presence of a biosurfactant. *Journal of Environmental Science and Health B*. 34: 793–803.
30. Mata-Sandoval, J.C., Karns, J. ve Torrents, A., 2000. Effects of rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* UG2 on the solubilization of pesticides. *Environmental Science and Technology*. 34: 4923–4930.
31. Mata-Sandoval, J.C., Karns, J. ve Torrents, A., 2001. Influence of rhamnolipids and Triton X-100 on the biodegradation of three pesticides in aqueous and soil slurries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49: 3296–3303.
32. Mulligan, C.N., 2005. Environmental applications for biosurfactants. *Environ Poll.* 133:183–98.

33. Urum, K., Pekdemir, T. ve Gopur, M., 2003. Optimum conditions for washing of crude oil-contaminated soil with biosurfactant solutions. *Transactions of the Institute of Chemical Engineering*. 81: 203–209.
34. Southam, G., Whitney, M. ve Knickerboker, C., 2001. Structural characterization of the hydrocarbon degrading bacteria–oil interface: implications for bioremediation. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 47: 197–201.
35. Shulga, A., Karpenko, E., Vildanova-Martishin, R., Turovsky A. ve Soltys, M., 2000. Biosurfactant-enhanced remediation of oil contaminated environments. *Adsorption Science and Technology*. 18 (2): 171–176.
36. Guo, Y. ve Mulligan C.N., 2006. Combined treatment of styrene-contaminated soil by rhamnolipid washing followed by anaerobic treatment. Chapter 1. In: Hudson RC, editor. *Hazardous Materials in Soil and Atmosphere*. New York: Nova Science Publishers. 1–38
37. Tan, H., Champion, J.T., Artiola, J.F., Brusseau, M.L. ve Miller, R.M., 1994. Complexation of cadmium by a rhamnolipid biosurfactant. *Environmental Science and Technology*. 28: 2402–2406.
38. Herman, D.C., Artiola, J.F. ve Miller, R.M., 1995. Removal of cadmium, lead and zinc from soil by a rhamnolipid biosurfactant. *Environmental Science and Technology*. 29: 2280–2285.
39. Ochoa-Loza, F., 1998. Physico-chemical factors affecting rhamnolipid biosurfactant application for removal of metal contaminants from soil. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
40. Neilson, J.W., Artiola, J.F. ve Maier, R.M., 2003. Characterization of lead removal from contaminated soils by non-toxic soil-washing agents. *Journal of Environmental Quality*. 32: 899–908.
41. Juwarkar, A.A., Nair, A., Dubey, K.V., Singh, S.K. ve Devotta, S., 2007. Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere*. 68: 1996–2002.
42. Mulligan, C.N. ve Gibbs, B.F., 1993. Factors influencing the economics of biosurfactants. *Biosurfactants, Production, Properties, Applications*. New York: Marcel Dekker. 329–37.
43. Sidal, U., Kolankaya N. ve Kurtonur, C., 2000. *Pseudomonas* sp. ile Zeytinyağı Fabrikası Atığından Biyosüpfektan Eldesi. *Turk J Biol*. 24: 611–625.
44. Nitschke, M. ve Pastore, G. M., 2006. Production and properties of a surfactant obtained from *Bacillus subtilis* grown on cassava wastewater. *Bioresource Technology* 97: 336–341.
45. Rodrigues, L.R., Teixeira, J.A. ve Oliveira, R., 2006. Low-cost fermentative medium for biosurfactant production by probiotic bacteria. *Biochemical Engineering Journal* 32: 135–142.